

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
Departamento de Óptica



**NUEVOS MÉTODOS DE MEDIDA 3D MEDIANTE
TRIANGULACIÓN ACTIVA.**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR

Javier Vargas Balbuena

Bajo la dirección del doctor

Juan Antonio Quiroga Mellado

Madrid, 2010

• ISBN: 978-84-693-1278-0

©Javier Vargas Balbuena, 2009

Nuevos métodos de medida 3D mediante triangulación activa

***MEMORIA PRESENTADA PARA OPTAR AL GRADO DE
DOCTOR POR***

Javier Vargas Balbuena

***Bajo la dirección del Doctor:
Juan Antonio Quiroga Mellado***



***Universidad Complutense de Madrid
Departamento de Óptica***

Madrid, Enero de 2009

*Cuando emprendas tu viaje a Ítaca
debes rogar que el viaje sea largo,
lleno de peripecias, lleno de experiencias.*

*No has de temer ni a los lestrigones ni a los cíclopes,
ni la cólera del airado Poseidón.*

*Nunca tales monstruos hallarás en tu ruta
si tu pensamiento es elevado, si una exquisita
emoción penetra en tu alma y en tu cuerpo.*

*Los lestrigones y los cíclopes
y el feroz Poseidón no podrán encontrarte
si tú no los llevas ya dentro, en tu alma,
si tu alma no los conjura ante ti.*

*Debes rogar que el viaje sea largo,
que sean mucho los días de verano;
que te vean arribar con gozo, alegremente,
a puertos que tú antes ignorabas.*

*Que puedas detenerte en los mercados de Fenicia,
y comprar unas bellas mercancías.*

*Acude a muchas ciudades del Egipto
para aprender, y aprender de quienes saben.*

*Conserva siempre en tu alma la idea de Ítaca:
llegar allí, he aquí tu destino.*

*Más no hagas con prisas tu camino;
mejor será que dure muchos años,
y que llegues ya viejo a la pequeña isla,
rico de cuanto habrás ganado en el camino.*

*No has de esperar que Ítaca te enriquezca:
Ítaca te ha concedido ya un hermoso viaje.*

*Sin ella, jamás habrías partido;
más no tiene otra cosa que ofrecerte.*

*Y si la encuentras pobre, Ítaca no te ha engañado.
y siendo ya tan viejo, con tanta experiencia,
sin duda sabrás ya que significa Ítaca*

KOSTANTINOS KAVAFIS (1863-1933)

“You are the sun that rises
You are the moon that lights the night
You are what paralyses me”

Esta tesis está dedicada a tí, Anita

Agradecimientos

“Escribid las injurias en la arena, grabad los beneficios en el mármol”

Claude Boiste

“Agradece a la llama su luz, pero no olvides el pie del candil que, constante y paciente, la sostiene en la sombra”

Rabindranath Tagore

Quiero dar mi más profundo y sincero agradecimiento a mi director de tesis, Juan Antonio Quiroga Mellado. Gracias por enseñármelo todo y darme una formación competitiva, por tener siempre tu puerta abierta a cualquier consulta (todavía hoy), por ser exigente cuando las cosas no fueron bien, por no conformarte con resultados buenos y exigirme seguir trabajando hasta que fueran muy buenos, por hacer que sienta esta tesis totalmente mía, por preocuparte de mi futuro y un largo etcétera. Reconozco que muchas veces el trabajo ha sido muy duro, incluso frustrante, pero tras ocho meses fuera de la universidad no siento más que gratitud. Espero que podamos seguir colaborando activamente en el terreno profesional y mantener una continua y estrecha relación personal durante muchos años.

Quiero agradecer también al Director del grupo de investigación Applied Optics Complutense Group, Prof. Eusebio Bernabeu Martínez así como a los diferentes Directores del Departamento de Óptica, Prof. José Manuel Guerra Pérez y Prof. María Luisa Calvo Padilla por poner a mi alcance los medios necesarios para la realización de esta tesis.

Asimismo este trabajo se ha podido realizar gracias al soporte económico de una beca de Formación de Personal Universitario (F.P.U) concedida por la Subdirección General de Universidades del Ministerio de Educación y Ciencia.

Quiero también agradecer a mis antiguos compañeros del Departamento de Óptica, Alejandro, Luismi, Infor, Juan Carlos, Alfredo, Chemita, Agus, Cuqui y un largo etcétera, su amistad, ayuda y sus fructíferas discusiones.

También me gustaría agradecer la confianza depositada en mí a mis nuevos responsables de Serco, Michel G. Breitfellner y Eduardo Ojero, así como del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Lola Sabau, Alberto Álvarez y especialmente a Tomás Belenguer por su continuo apoyo y estímulo. Me gustaría también agradecer la cálida bienvenida que he recibido de mis nuevos compañeros del LINES, especialmente de Néstor, Luis, David, Rene, Dani y Hugo.

I can not forget my amazing and exciting stay in the VISION for Industry Communications and Services (VISICS) group of the K.U.Leuven University. These fourth months in Leuven totally changed my way of thinking and my life. It was one of the best times of my life. Belgium is still in my hearth, I love this country and its people. I gratefully acknowledge Prof. Luc Van Gool and Thomas Koninckx from K.U.Leuven and Laurent Hermans and Frans Nijs from ICos Vision Systems for their support and confidence. Thanks for letting me lead this project. Lot of thanks to my friends, my cool swedish officemate Ola Millnert and to the basque country triathlon man Xabier Carrera. You are very positive guys.

También quiero agradecer al Santo Job la paciencia que ha dado a los verdaderos sufridores de esta tesis, mis padres (Ana y Ricardo) y mi novia, Anita. Desde Junio de 2008, fecha en la que me incorporo en el Laboratorio de Instrumentación Espacial, la mezcla de un gran pico de trabajo debido al proyecto IMaX con la tarea de escribir la tesis por las tardes y seguir entrenando con mi club de triatlón han hecho que solo me salgan las cuentas durmiendo una media de 5-6 horas al día, y eso cambia el carácter de cualquiera. ¡Os prometo que volveré a ser el de siempre!, Finalmente, no puedo olvidarme de nuestro distinguido “club del chuleton”. Quiero agradecer a sus miembros honoríficos Ramón Vicente y Javier Saceda su gran amistad. Sin vosotros no sería el mismo. ¡Os quiero!

Resumen

Los métodos ópticos basados en triangulación activa han experimentado un gran avance en la pasada década y están comenzando a sustituir a los sensores tridimensionales basados en contacto en las diversas aplicaciones industriales de estos dispositivos.

Estos métodos ópticos tienen propiedades que los hacen muy interesantes, como su gran velocidad, su capacidad de medida sin contacto y a campo completo y su bajo coste. No obstante, estos métodos presentan limitaciones prácticas cuando se está interesado en medir objetos extensos con gran precisión. En primer lugar los métodos de calibración para estos sistemas con los que se obtiene los resultados más precisos son muy difíciles de utilizar cuando se está interesado en calibrar un volumen de gran tamaño. Por otra parte, los sistemas de medida 3D basados en triangulación activa están caracterizados por tener una relación fija entre el área escaneada y la resolución en profundidad obtenida. Si se desea inspeccionar un área extensa se debe esperar obtener una resolución en profundidad pobre. Para obtener una medida 3D de un área extensa con alta resolución en profundidad es necesario realizar una medida en multiresolución. Finalmente, los métodos de triangulación activa estándares no son aplicables en el caso de que se desee inspeccionar una superficie no-cooperativa con una gran resolución espacial. Las superficies no-cooperativas se caracterizan por presentar una gran variación espacial de la reflectividad, de forma que existen regiones muy brillantes y muy oscuras.

En la presenta memoria de tesis se presentan nuevos métodos de medida 3D mediante triangulación activa para resolver los problemas anteriormente mencionados. Por una parte, se introduce un nuevo método de calibración mixto para un sistema de triangulación activa que permite calibrar con gran precisión volúmenes de gran tamaño. Adicionalmente, se presentan dos nuevos métodos

para la medida en multiresolución, uno local y otro global y finalmente se presenta un método para la medida 3D de superficies no-cooperativas.

Nomenclatura

C	centro óptico
$S.R.M$	sistema de referencia del mundo
M_w	punto 3D arbitrario referido respecto al $S.R.M$
M_c	punto 3D arbitrario referido respecto al sistema de referencia de la cámara
M_p	punto 3D arbitrario referido respecto al sistema de referencia del proyector
M_w^α	coordenadas 3D (en milímetros) respecto del sistema de referencia del mundo ($S.R.M$) de un plano de calibración en una posición denotada por α
M^α	coordenadas 3D (en milímetros) de un plano de calibración en una posición denotada por α respecto a un sistema de referencia arbitrario unido al plano calibración.
$m_c = [u_c, v_c, 1]^T$	coordenadas homogéneas en el plano retinal de la cámara en píxeles
$\hat{m}_c = [\hat{u}_c, \hat{v}_c, 1]^T$	coordenadas homogéneas en el plano retinal de la cámara en milímetros
$m_p = [u_p, v_p, 1]^T$	coordenadas homogéneas en el plano retinal del proyector en píxeles

$\hat{m}_p = [\hat{u}_p, \hat{v}_p, 1]^T$	coordenadas homogéneas en el plano retinal del proyector en milímetros
$m_{C,i}^\alpha$	coordenadas homogéneas en el plano retinal de la cámara en píxeles correspondientes a la i -ésima marca contenida en el plano de calibración colocado en una posición denotada por α
f_c	distancia focal de una cámara en píxeles
\hat{f}_c	distancia focal de una cámara en milímetros
f_p	distancia focal de un proyector en píxeles
\hat{f}_p	distancia focal de un proyector en milímetros
s	factor de escala arbitrario
c	punto principal
$c_c = [c_c^x, c_c^y, 1]^T$	coordenadas en píxeles del punto principal de la cámara respecto del píxel superior izquierdo
$c_p = [c_p^x, c_p^y, 1]^T$	coordenadas en píxeles del punto principal del proyector respecto del píxel superior izquierdo
N	operación de normalización
D	operación que introduce la distorsión radial y tangencial
$[x_n, y_n, 1]^T$	coordenadas métricas normalizadas
$[x_d, y_d, 1]^T$	coordenadas métricas distorsionadas
$[k_1 \quad k_2]$	coeficientes de la distorsión radial
$[p_1 \quad p_2]$	coeficientes de la distorsión tangencial

T_x	anchura en píxeles de la franja proyectada en el PS paralela al eje X
T_y	anchura en píxeles de la franja proyectada en el PS paralela al eje Y
Φ^α	fase absoluta de un plano de calibración en una posición denotada por α
$[u_{C,f}, v_{C,f}]$	sistema de referencia asociado a la cámara principal o fija
$[u_{C,aux}, v_{C,aux}]$	sistema de referencia asociado a la cámara auxiliar
$[u_P, v_P]$	sistema de referencia asociado al proyector en la configuración sin zoom
$[\bar{u}_P, \bar{v}_P]$	sistema de referencia asociado al proyector en la configuración con zoom
K_C	parámetros intrínsecos de la cámara
K_P	parámetros intrínsecos del proyector
R_C	matriz de rotación que relaciona el sistema de referencia del mundo con el sistema de referencia de la cámara
R_P	matriz de rotación que relaciona el sistema de referencia del mundo con el sistema de referencia del proyector
\mathbf{t}_C	vector de traslación que relaciona el sistema de referencia del mundo con el sistema de referencia de la cámara
\mathbf{t}_P	vector de traslación que relaciona el sistema de referencia del mundo con el sistema de referencia del proyector

R	matriz de rotación que relaciona el sistema de referencia de la cámara con el sistema de referencia del proyector
t	vector de traslación que relaciona el sistema de referencia de la cámara con el sistema de referencia del proyector
E	exposición
IR	irradiancia
T	función de transferencia de una cámara
Z_{ϕ}	función de calibración que transforma fase absoluta en coordenada de profundidad.
X_{ϕ}	función de calibración que transforma fase absoluta en coordenada lateral X
Y_{ϕ}	función de calibración que transforma fase absoluta en coordenada lateral Y

Acrónimos

Coordinate Machine Measurement	(CMT)
Computerized Tomography	(CT)
Digital Image Correlation	(DIC)
Digital Light Processing	(DLP)
Digital Micromirror Device	(DMD)
Direct Linear Transformation	(DLT)
Gray-Code	(GC)
Iterative Closest Point	(ICP)
Look Up Table	(LUT)
Phase-Shifting	(PS)
Liquid Crystal Display	(LCD)
Liquid Crystal on silicon	(LCos)
Singular Value Decomposition	(SVD)
Software Development Kit	(SDK)

Índice

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	MÉTODOS DE DIGITALIZACIÓN 3D Y APLICACIONES	1
1.1.1	MÉTODOS DE DIGITALIZACIÓN 3D	1
1.1.2	APLICACIONES	4
1.2	MOTIVACIÓN DE LA TESIS	5
1.3	OBJETIVOS DE LA TESIS	7
1.4	ESTRUCTURA DE LA TESIS	8
2	TRIANGULACIÓN ACTIVA	11
2.1	ANTECEDENTES	11
2.2	FORMACIÓN DE IMAGEN	23
2.2.1	LA CÁMARA <i>PIN-HOLE</i>	23
2.2.2	LA CÁMARA <i>PIN-HOLE</i> CON DISTORSIÓN	28
2.2.3	PROYECTORES DE LUZ	31
2.3	CALIBRACIÓN DE UN SISTEMA 3D	34
2.3.1	MÉTODOS DE CALIBRACIÓN DIRECTA	35
2.3.2	MÉTODOS DE CALIBRACIÓN BASADOS EN MODELO	37
2.4	RECONSTRUCCIÓN 3D	41
3	MÉTODO MIXTO DE CALIBRACIÓN	43
3.1	INTRODUCCIÓN	43
3.1.1	RECONOCIMIENTO, IDENTIFICACIÓN Y LOCALIZACIÓN DE MARCAS	44
3.2	MÉTODOS ESTÁNDAR DE CALIBRACIÓN	50
3.2.1	MÉTODOS DE CALIBRACIÓN DIRECTOS	51
3.2.2	MÉTODOS DE CALIBRACIÓN BASADOS EN MODELO	57
3.3	MÉTODO PROPUESTO DE CALIBRACIÓN MIXTA	61
3.3.1	PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN	62
3.3.2	PROCEDIMIENTO DE MEDIDA	63

3.3.3	RESULTADOS EXPERIMENTALES	65
3.4	CONCLUSIONES	74
<u>4 MÉTODO LOCAL DE MULTIRESOLUCIÓN</u>		<u>75</u>
4.1	INTRODUCCIÓN	76
4.2	FUNDAMENTO TEÓRICO	79
4.2.1	RESOLUCIÓN EN PROFUNDIDAD	79
4.2.2	MEDIDA GLOBAL DE LA SUPERFICIE. MEDIDA EXTENSA	82
4.2.3	CORRESPONDENCIAS ENTRE LAS CÁMARAS AUXILIAR Y PRINCIPAL	84
4.2.4	MEDIDA EN MULTIRESOLUCIÓN	86
4.3	RESULTADOS EXPERIMENTALES	93
4.4	INSPECCIÓN DE DEFECTOS EN GRANDES SUPERFICIES AERONÁUTICAS	102
4.5	CONCLUSIONES	108
<u>5 MÉTODO GLOBAL DE MULTIRESOLUCIÓN</u>		<u>109</u>
5.1	INTRODUCCIÓN	109
5.2	FUNDAMENTO TEÓRICO	111
5.2.1	AUTOCALIBRACIÓN MEDIANTE LA MATRIZ DE PROYECCIÓN	111
5.2.2	CASO 1: AUTOCALIBRACIÓN AL MODIFICAR EL PROYECTOR	113
5.2.3	CASO 2: AUTOCALIBRACIÓN AL MODIFICAR LA CÁMARA	116
5.2.4	MÉTODO DE MULTIRESOLUCIÓN	119
5.2.5	CONFIGURACIONES DEGENERADAS	120
5.3	RESULTADOS EXPERIMENTALES	121
5.4	CONCLUSIONES	128
<u>6 MEDIDA DE SUPERFICIES NO COOPERATIVAS</u>		<u>129</u>
6.1	INTRODUCCIÓN	130
6.2	MÉTODO PROPUESTO	133
6.3	MEDIDA 3D DE MICROCHIPS MEDIANTE TRIANGULACIÓN ACTIVA	140
6.3.1	RESULTADOS EXPERIMENTALES	142
6.4	CONCLUSIONES	154
<u>7 CONCLUSIONES</u>		<u>155</u>

8 TRABAJO FUTURO **159**

AI LIBRERÍA DE TRIANGULACIÓN ACTIVA “SCANNINGLIB” **165**

AI.1	INTRODUCCIÓN:	165
AI.1.1	¿QUÉ ES “SCANNINGLIB”?	165
1.9.2	MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS	166
1.9.3	VENTAJAS DE SCANNINGLIB	166
1.10	ESTRUCTURA DE “SCANNINGLIB”	167
1.10.1	ESTRUCTURA DE OBJETOS DE SCANNINGLIB	167
1.10.2	USO LÓGICO DE LOS OBJETOS DE “SCANNINGLIB”	174
1.10.3	INTERFAZ GRÁFICO DE SCANNINGLIB PARA MATLAB©	176

**AII SISTEMA DE ACOPLÓ ÓPTICO A MONTURA C PARA UN PROYECTOR
COMERCIAL** **185**

1.11	INTRODUCCIÓN	185
1.12	REQUERIMIENTOS	186
1.13	DISEÑOS	187
1.13.1	SISTEMA 1	188
1.13.2	SISTEMA 2	188
1.13.3	SISTEMA 3	189
1.13.4	COMPARACIÓN DE SISTEMAS.	190
1.14	REALIZACIÓN PRÁCTICA	191
1.15	CONCLUSIONES	193

REFERENCIAS **195**

Capítulo 1

Introducción

“En la vida humana sólo unos sueños se cumplen, la gran mayoría se roncan”

Enrique Jardiel Poncela

“La única manera de conocer los límites de lo posible es aventurarse un poco más allá de ellos, hacia lo imposible”

Arthur C. Clarke

Este capítulo presenta una introducción general a los diferentes métodos para la medida 3D de objetos así como la motivación y objetivos de la tesis. Adicionalmente, se proporciona la estructura del trabajo en el final del capítulo.

1.1 Métodos de digitalización 3D y aplicaciones

En este primer apartado se da una breve descripción de las principales técnicas de reconstrucción 3D existentes y se introducen algunas de sus aplicaciones más importantes.

1.1.1 Métodos de digitalización 3D

Las técnicas para la digitalización 3D de objetos se dividen fundamentalmente en métodos en los que no es necesario el contacto con la superficie a medir y en métodos basados en el contacto con la misma. Los métodos de no-contacto pueden interactuar con el objeto proyectando alguna forma de energía sobre este (activos), o no interactuar con este (pasivos).

Los sensores basados en contacto están constituidos típicamente por una punta montada sobre un brazo robot (*Joint Arms*) o directamente en un sistema de posicionamiento tridimensional muy preciso (*Coordinate Machine Measurement*). Estos sistemas mecánicos determinan las coordenadas 3D de un conjunto de puntos sobre la superficie a medir “tocándolos” con la punta cuya localización espacial está determinada con mucha precisión. Las principales desventajas de estos métodos son:

- Requieren mucho tiempo de medida
- Alto coste del equipo
- Métodos no aplicables en el caso de objetos frágiles
- Dificultad de utilización del equipo de medida

La principal ventaja de estos métodos radica en la gran precisión que se obtiene en la medida 3D de los puntos “tocados” sobre la superficie problema.

Los métodos de no-contacto pueden interaccionar con el objeto proyectando energía sobre este o no. Los métodos que proyectan energía se llaman activos mientras que los que no interaccionan con el objeto se llaman pasivos. Los métodos activos se dividen en métodos basados en transmisión (aquellos que recogen la energía transmitida por el objeto) y en reflexión (aquellos que recogen la energía reflejada por el mismo). El principal método de reconstrucción 3D basado en transmisión es la tomografía computerizada industrial (CT). Este método se basa en lanzar sobre el objeto problema rayos X de alta energía y medir la cantidad de radiación que lo atraviesa desde diferentes puntos de vista. Mediante este método es posible obtener una reconstrucción volumétrica del objeto muy precisa. Las principales ventajas de este método frente a las técnicas basadas en reflexión radican en que es fuertemente insensible a las propiedades reflectivas de la superficie problema y que puede medir las cavidades internas del objeto. Las principales desventajas se encuentran en que son sistemas muy caros, muy difíciles de mantener debido al uso de radiación de alta energía y que son muy sensibles a variaciones en la densidad del objeto.

Los métodos reflectivos pueden ser subdivididos a su vez en métodos ópticos y no-ópticos. Los métodos no-ópticos se basan fundamentalmente en la medida del tiempo de vuelo al proyectar sobre la superficie problema ultrasonidos o microondas. Los métodos basados en ultrasonidos son muy baratos aunque su precisión es baja. Las técnicas basadas en microondas se utilizan para medir objetos de grandes dimensiones. Los métodos ópticos consisten en la proyección de luz sobre el objeto a medir. La luz reflejada en el objeto es recogida desde otro punto de vista. Las principales técnicas dentro de este grupo son los métodos interferométricos, los basados en el efecto moiré y las técnicas de triangulación activa.

Finalmente, los métodos pasivos están basados en la extracción de información tridimensional de un objeto o escena mediante el uso de una o varias cámaras. Los métodos pasivos son fundamentalmente, la extracción de formas a partir de sombras (*shape-from-shading*), estéreo-visión y métodos de extracción de formas a partir del flujo óptico. Estos métodos requieren muy poco hardware pero sus medidas no son precisas ni densas.

La Figura 1.1 muestra un esquema de los principales métodos de reconstrucción tridimensional.

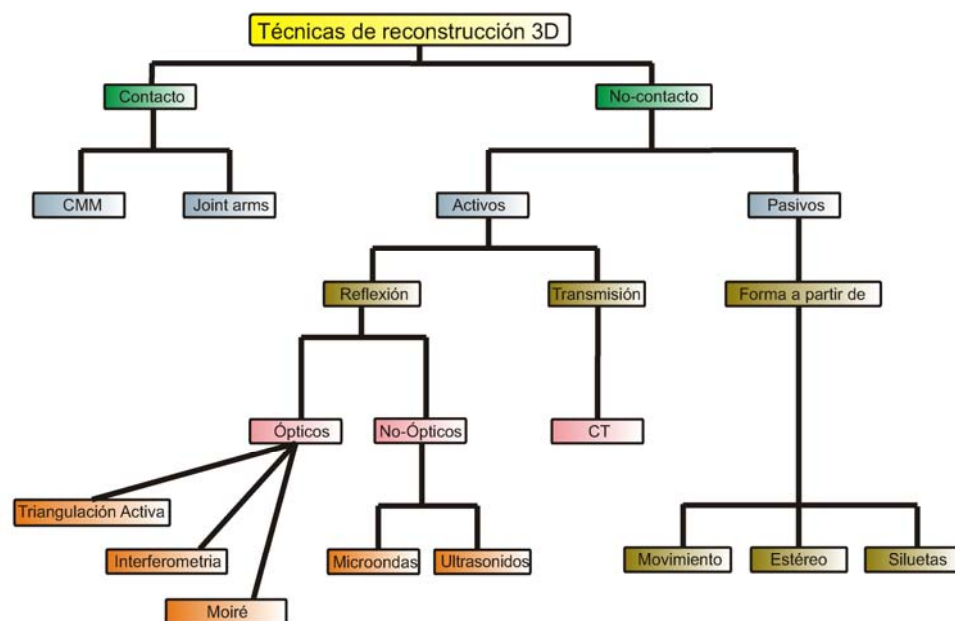


Figura 1.1 Esquema de los principales métodos de reconstrucción tridimensional

1.1.2 Aplicaciones

Las aplicaciones de los métodos de reconstrucción 3D de objetos son muy numerosas y engloban procesos de control de calidad y fabricación en industria, simulación virtual, medicina, marketing, etc. Una de las aplicaciones principales de estos métodos es la llamada ingeniería inversa. La ingeniería inversa es un método para la creación o recreación de nuevos productos a partir de productos existentes y a veces obsoletos. La ingeniería inversa consiste en construir un modelo CAD de una pieza u objeto ya existente. Es posible que las partes más antiguas se hayan fabricado sin utilizar aplicaciones CAD. Mediante ingeniería inversa por tanto es posible:

- Digitalización de objetos
- Creación de archivos digitales 3D a partir de objetos existentes
- Evaluación de conformidad de las partes fabricadas con las partes originales
- Modelado en 3D
- Diseño de partes y ensambles, mecanizado y guías
- Análisis de elementos finitos

Por otra parte, otra de las grandes aplicaciones de estos métodos de medida 3D es la inspección de objetos ya fabricados para control de calidad. En la fabricación de una pieza existen generalmente tolerancias que deben cumplirse. Para comprobar que la pieza se ha fabricado correctamente y cumple los requisitos necesarios es imprescindible un proceso de control de calidad. Para verificar que una pieza está dentro de las tolerancias necesarias es posible hacer una medida 3D de la misma. Comparando las diferencias entre lo diseñado y lo medido se determina la validez de la pieza fabricada.

Otras aplicaciones de estas técnicas cuyo interés se está incrementando de forma espectacular en años recientes son los métodos de reconstrucción 3D aplicados a la generación de efectos especiales en películas, videojuegos y

realidad virtual. En la generación de efectos especiales, personas u objetos son digitalizados. Una vez computerizados estos objetos pueden ser editados, transformados, clonados, etc. mediante un computador. Por otra parte, la realidad virtual puede ser utilizada para visitar museos en cualquier parte del mundo; de esta forma, pueden observarse simultáneamente piezas de distintos museos que han sido digitalizadas previamente con un alto grado de detalle.

Los métodos de reconstrucción 3D están altamente extendidos dentro del campo de la medicina. Métodos de diagnóstico por imagen como PET (*Positron Emission Tomography*), TAC (*Tomografía Axial Computerizada*), MRI (*Magnetic Resonance Imaging*) o ecografía. Otras aplicaciones de dichos métodos en medicina puede ser la generación de prótesis dentales u óseas a medida para los pacientes, generación de plantillas a medida, etc. Finalmente, también es de gran importancia la endoscopia tridimensional para el diagnóstico o realización de intervenciones quirúrgicas lo menos invasivas posibles.

Dentro del campo del deporte de alta competición estas técnicas están extendidas para la realización de estudios biomecánicos y antropométricos. De esta forma es posible anticipar posibles lesiones así como realizar un estudio muy preciso de la técnica del deportista identificando movimientos erróneos.

1.2 Motivación de la tesis

En el campo de la metrología óptica mediante procesamiento de imágenes, el término “medida tridimensional (3D) de formas” se refiere a la capacidad para medir de forma absoluta y sin contacto la geometría 3D de un objeto opaco independientemente de la reflectividad de la superficie, así como de su distancia al sensor y al sistema de iluminación.

La triangulación activa mediante la proyección de patrones de luz estructurada es uno de los métodos más usados dentro de la metrología óptica 3D. El término “patrones de luz estructurada” se refiere a la capacidad de generar distribuciones de luz con un diseño conocido. Entre las muchas posibilidades existentes, los patrones de franjas sinusoidales y los patrones de franjas binarios

son los más usados. En esta técnica las coordenadas 3D de cada punto de una imagen se obtienen mediante la captación del patrón distorsionado por el objeto, el conocimiento de los ángulos entre los sistemas de proyección y observación, así como de la longitud de la base óptica que une los puntos nodales de ambos sistemas. Mediante técnicas de codificación absoluta (como el Gray-Code) es posible resolver de forma automática el problema de la correspondencia. Una vez conocida esta, la medida de la posición espacial del punto en cuestión se mediría por triangulación.

Un aspecto importante de este tipo de métodos de medida 3D es que el cociente entre la resolución espacial y la dimensión lateral es un parámetro del sistema; es decir, estas técnicas siempre miden con el mismo error relativo a la dimensión lateral. Los valores típicos de este error están en el rango de 10^{-4} - 10^{-5} . Para la medida 3D en condiciones estáticas y/o superficies cooperantes, donde el sistema no necesite ser modificado (cambio de focal, variación de distancias relativas) y la resolución obtenida sea satisfactoria, las técnicas existentes son suficientes para la mayoría de las situaciones. Sin embargo, hay situaciones en las que es necesario o bien aumentar la resolución lateral y/o la sensibilidad ante variaciones de profundidad del sistema, mover la cabeza sensora para obtener diferentes vistas del objeto o la medida de objetos con grandes variaciones espaciales de reflectancia espectral. Adicionalmente, las técnicas de calibración de los sistemas de medida tridimensional —métodos basados en modelo o directos (estos métodos se explican con detalle en el Capítulo 3) — poseen problemas prácticos. Mediante el uso de métodos directos es muy difícil la calibración de un sistema cuando se está interesado en medir grandes superficies debido a la necesidad de usar posicionadores lineales. Por otra parte, los métodos basados en modelo son menos precisos que los directos y necesitan realizar optimizaciones no-lineales para la calibración del sistema, por lo existe la posibilidad de resultados erróneos en la calibración debido a la convergencia a un mínimo local.

La motivación de la presente tesis ha sido la de abordar los problemas expuestos anteriormente.

1.3 Objetivos de la tesis

En este trabajo se pretenden desarrollar nuevos métodos de triangulación activa para la medida 3D de objetos opacos que traten con los tipos de problemas mencionados en la sección anterior. El montaje típico será de una cabeza de medida móvil consistente en una cámara y un proyector. Los objetivos principales de este proyecto de tesis se pueden resumir en los siguientes 4 puntos:

- I. Nuevas técnicas de medida multiresolución. Muchos objetos técnicos tienen tamaños grandes a la vez que presentan un nivel de detalle elevado [SNS 04][Kayser 04]. Un ejemplo típico es la detección de defectos superficiales en planchas de materiales compuestos de interés aeronáutico. Dado que el error relativo es constante, lo normal es que no se pueda realizar simultáneamente la medida de la forma global, así como de los pequeños defectos superficiales que puedan estar presentes. Por lo tanto el desarrollo de técnicas para la medida con multiresolución que permitan la integración de información global con información local trabajando a varias resoluciones, ángulos de vergencia y valores de focal es un objetivo muy interesante en metrología óptica 3D.
- II. Nuevos métodos de autoreferenciado. Cuando se mide un objeto a multiresolución es habitual que la cabeza sensora tenga que moverse en el espacio. Para mantener un marco global de referencia respecto del cual se pueda componer todas las medidas 3D obtenidas, es necesario el desarrollo de técnicas de autoreferenciado, basadas en sistemas externos o internos que permitan la determinación precisa de los movimientos 3D de la cabeza sensora [Li 03][Lu 03].
- III. Nuevos métodos para la medida mediante triangulación activa en superficies no-cooperativas. Para solucionar los problemas asociados con la variación de la reflectividad sobre el objeto a medir, en triangulación activa es necesario el desarrollo de nuevas técnicas que permitan la compensación de las variaciones de la irradiancia reflejada [Nayar 03][Caspi 98][Grossberg 04].

- IV. Nuevos métodos de calibración para un sistema de triangulación activa. Los métodos existentes —método directo y método basado en modelo— poseen problemas intrínsecos. Los métodos directos son las técnicas de calibración más precisas pero no son adecuadas para la medida de grandes superficies, que puede ser interesante para inspeccionar grandes planchas aeronáuticas [Brenner 98][Liu 03]

1.4 Estructura de la tesis

La presente memoria de tesis está dividida en ocho capítulos y dos apéndices. Los capítulos uno y dos introducen al lector en los principales métodos de digitalización 3D y aplicaciones para seguidamente centrarse en los métodos de triangulación activa. En este primer capítulo se han situado los métodos de medida 3D mediante proyección de luz estructurada dentro de los diferentes métodos de digitalización tridimensional. Finalmente, se han introducido la motivación, objetivos y estructura del presente trabajo. El capítulo dos presenta el estado de arte de las técnicas para la medida de 3D mediante luz estructurada, introduciendo la notación que se seguirá a lo largo de la memoria.

Los capítulos tres, cuatro, cinco y seis constituyen la parte principal de la memoria siendo cada capítulo un trabajo novedoso cuya finalidad es la de cumplir los objetivos expuestos en el apartado 1.3. Cada uno de estos capítulos ha dado lugar a una publicación. En el capítulo tres se explica un nuevo método de calibración mixto que comparte los beneficios de los métodos directos y fotograméticos, solucionando algunos de sus problemas. En los capítulos cuatro y cinco se introducen dos métodos para la medida en multiresolución, uno global y otro local. Finalmente en el capítulo seis se presenta un nuevo método para la medida 3D de superficies no-cooperativas. En el capítulo siete se introducen las conclusiones de esta tesis y en el ocho el trabajo futuro previsto. En la presente memoria de tesis se incluyen dos apéndices. En el apéndice I se muestra la librería desarrollada por el doctorando para la medida 3D mediante proyección de franjas escrita en C# para su uso desde MATLAB. En el apéndice II se muestra el método para realizar un acoplo óptico a una montura C mediante un sistema

relay. De esta forma se modifica la óptica de un proyector comercial para conseguir un mayor rango de campo proyectado.

Capítulo 2

Triangulación Activa

“La escalera ha de barrerse empezando desde arriba”

Proverbio rumano

“Todo lo que no es eterno está eternamente pasado de moda”

Clive Staples Lewis

Los métodos de medida tridimensional mediante la proyección de luz estructurada constituyen el espacio de trabajo de esta tesis. Este capítulo presenta una introducción general a los métodos de medida 3D mediante triangulación activa, introduciéndose la notación que se seguirá a lo largo de toda la memoria.

En este capítulo inicialmente se introducen los distintos métodos de codificación mediante proyección de luz estructurada haciendo una clasificación entre ellos y enumerando sus ventajas e inconvenientes (apartado 2.1 Antecedentes). Seguidamente se explica brevemente el modelo de formación de imagen para una cámara y un proyector (apartado 2.2 Formación de imagen) y los métodos de calibración de un sistema 3D (apartado 2.3 Calibración de un sistema 3D). Finalmente se explica el proceso de triangulación (apartado 2.4 Reconstrucción 3D).

2.1 Antecedentes

La obtención de información tridimensional de un objeto parece una tarea fácil. El ser humano está dotado de la capacidad de ver en tres dimensiones de forma rápida, eficiente y sin aparente esfuerzo. Podemos intentar utilizar dos cámaras en vez de los ojos y un ordenador a modo de cerebro para medir un objeto en tres dimensiones mediante un computador. Un primer análisis nos muestra la

dificultad de nuestro propósito. La visión humana no está diseñada para medir sino para percibir. Nosotros percibimos el mundo tridimensional usando la experiencia acumulada a través de nuestros años de vida. Por otra parte intentar simular el comportamiento del cerebro mediante un ordenador es hoy en día simplemente ficción.

El método mediante el cual se obtiene información tridimensional usando dos o más cámaras se conoce en la literatura como estéreo visión [HZ 00][Brown 03][YSK 04][Trucco 98]. Este método está basado en el principio de triangulación. A partir de puntos correspondientes en dos o más cámaras se obtienen las coordenadas 3D calculando el corte de las diferentes líneas de vista. En la Figura 2.1 aparece un esquema del proceso de triangulación mediante dos cámaras. En dicha figura aparecen dos cámaras y sus respectivos centros de proyección simbolizados por C_1 y C_2 . El punto 3D M_w , referido respecto a un sistema de referencia arbitrario (sistema de referencia del mundo, $S.R.M$), se obtiene mediante triangulación de los puntos correspondientes m_{C_1} y m_{C_2} . Para poder triangular es necesario modelar las cámaras así como conocer su posición relativa. Esto se consigue mediante un proceso de calibración.

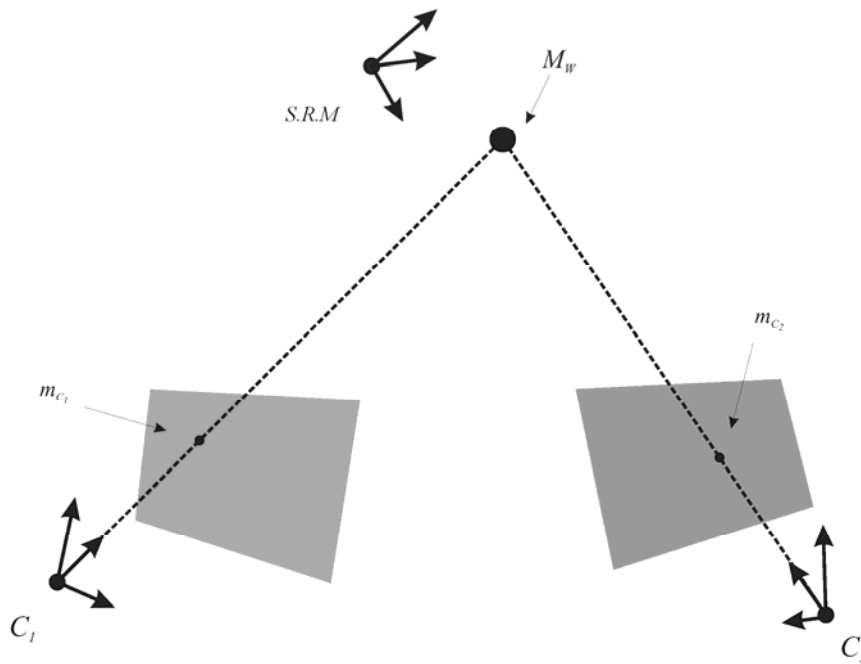


Figura 2.1 Esquema de un sistema de estéreo visión formado por dos cámaras.

Podemos dividir el proceso de medida 3D en tres subprocesos. En primer lugar es necesario calibrar el sistema; seguidamente se deben obtener los puntos correspondientes y finalmente triangularlos. De los tres subprocesos el más difícil de conseguir con éxito es la obtención de los puntos correspondientes; es decir, dado un píxel en una cámara, buscar su correspondiente en otra cámara que observa el mismo punto del objeto a medir. En la Figura 2.1, m_{C_1} y m_{C_2} son puntos correspondientes observando el mismo punto 3D M_w .

A lo largo de los años se ha realizado un gran esfuerzo para tratar de resolver el problema de la correspondencia. Una posibilidad consiste en el uso de la técnica conocida como *Digital Image Correlation* (DIC). DIC fue inicialmente concebido en la Universidad del Sur de Carolina en los años 80 [Chu 85][Bruck 89][Peters 82] y ha sido perfeccionado continuamente [Sutton 00][Tiwari 06]. Cuando se observa un objeto texturizado podemos identificar un píxel de forma unívoca en una imagen tomando una pequeña región alrededor de él. Comparando esta subimagen alrededor de un píxel m_{C_1} con vecindades alrededor de los píxeles pertenecientes a otra cámara C_2 (obsérvese la Figura 2.1) podemos identificar correspondencias mediante la búsqueda de un máximo de una función de similitud. La función de similitud usada es la correlación normalizada. Una limitación de la técnica descrita es que el objeto tiene que estar texturizado. Por otra parte si los puntos de vista de las distintas cámaras son muy diferentes aparece lo que se conoce con el nombre de distorsión de perspectiva y lo que ve una cámara es muy distinto de lo que ve la otra, incluso trabajando con pequeñas vecindades. Para resolver este problema es necesario deformar la región que rodea al píxel correspondiente candidato. El método de búsqueda de correspondencias mediante correlación digital es muy costoso desde un punto de vista computacional así como en tiempo de cómputo.

Se puede resolver el problema de la correspondencia de una forma rápida, eficaz y útil incluso en el caso de que el objeto a medir no tenga textura. La solución consiste en cambiar una de las cámaras por un proyector. Esta técnica se conoce con el nombre de triangulación activa. A todos los efectos un proyector se puede modelar de la misma forma que una cámara; por esta razón se dice que un

proyector es una cámara inversa. Gracias al uso de un sistema estéreo formado por una cámara y un proyector es posible resolver el problema de la correspondencia de forma inmediata. Los métodos de triangulación activa están basados en el uso de luz estructurada para codificar el volumen de trabajo. Se entiende por luz estructurada a la proyección de un patrón o conjunto de patrones de luz conocidos sobre el objeto a medir, de tal forma que cada píxel en el proyector tenga un código asociado, identificable y diferente del resto. Existe una relación directa entre los códigos de los píxeles y sus coordenadas en el plano retinal del proyector. Estos códigos son números codificados en el patrón —o patrones— de luz mediante niveles de gris, color o representaciones geométricas. Debido a que el patrón o patrones están codificados, se resuelve las correspondencias entre cámara y proyector de forma inmediata; el proceso consiste en capturar la imagen de esos patrones sobre el objeto. Seguidamente el patrón —o patrones— es decodificado, obteniéndose así un código para cada píxel de la cámara directamente relacionado con el píxel correspondiente en el proyector. Finalmente mediante la relación conocida que existe entre código y coordenadas en el plano retinal del proyector se obtienen las correspondencias cámara-proyector.

Existen diferentes estrategias de codificación mediante luz estructurada. Es posible codificar en el dominio del tiempo, del espacio o de forma directa [Bes 98][Battle 98][Salvi 04][Pages 03]. Utilizando los métodos basados en el dominio del espacio y de forma directa, es posible la codificación (y por tanto la medida 3D) mediante la proyección de un único patrón, cosa que no es posible codificando en el dominio del tiempo. Es necesario usar técnicas basadas en medida mediante un solo patrón cuando el objeto a medir se deforma o cambia durante la medida. Por otra parte, las técnicas basadas en codificación en el dominio del tiempo poseen mayor precisión [Salvi 04].

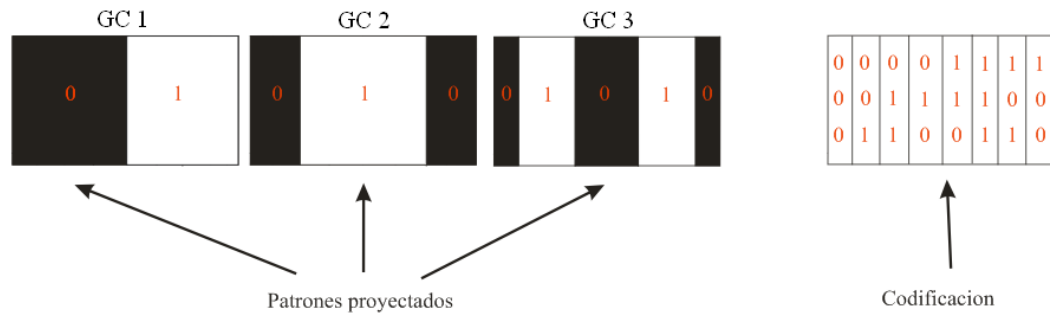


Figura 2.2 Ejemplo de codificación en el dominio del tiempo mediante la proyección de patrones binarios. A un píxel iluminado se le asigna un 1 mientras que a uno oscuro se le asigna un 0. Mediante la proyección de 3 imágenes podemos codificar 8 franjas de forma unívoca.

En la codificación en el dominio del tiempo, se proyecta un conjunto conocido de patrones sobre el objeto. En el trabajo seminal de Postdammer et al [PA 82] se codifica el volumen de trabajo mediante la proyección de códigos binarios. A un punto iluminado le corresponde un código de 1, mientras que a uno no iluminado le corresponde uno de 0. Proyectando un conjunto de patrones, codificamos cada punto del objeto asociándole un *codeword* o palabra compuesta por una sucesión ordenada de 0s y 1s. Cuantos más patrones se proyecten la longitud de la palabra será mayor y se obtendrá una mayor resolución espacial. Mediante la proyección de n patrones codificamos 2^n posiciones discretas en el objeto a medir. Es posible mejorar el método introducido por Postdammer remplazando los códigos binarios por códigos Gray. El uso de estos códigos Gray garantizan que *codewords* consecutivos tienen una distancia de Hamming igual a la unidad, siendo el método más robusto frente al ruido [ISM 84]. Se denomina distancia de Hamming entre dos palabras o *codewords* al número de bits en que se diferencian.

La Figura 2.2 muestra los tres primeros patrones Gray tal y como son proyectados. Como puede observarse la distancia de Hamming entre *codewords* consecutivos es la unidad. Se ha trabajado activamente en mejorar el método de Inocuchi et al [ISM 84]; introduciendo códigos de corrección de errores [MKS 81]. Trobina en 1995 [Trobina 95] presentó un modelo de error para los sistemas basados en proyección de franjas mediante patrones codificados con códigos Gray. Demostró que el punto crucial es la localización precisa de los bordes de las franjas en la imagen; de esta forma se ha trabajado activamente en métodos para la precisa localización de estos bordes de las franjas [VM 98][SS 03].

Un grave inconveniente de los métodos basados en proyección de patrones binarios es que la resolución espacial que se obtiene está limitada por la anchura de la franja con mayor frecuencia espacial (franja más estrecha). En la mayoría de los casos dicha resolución es muy pobre. En el trabajo de Ghüring et al [Ghüring 01] se mejora la resolución espacial proyectando varias veces el patrón con mayor frecuencia espacial e introduciendo un desplazamiento de un píxel entre patrones en la dirección de modulación de las franjas. Más habitual es el método del Phase-Shifting (PS) tomado del campo de la interferometría para mejorar la resolución espacial [Krattenthaler 93][Bergmann 95][Sansoni 99][Coggrave 00][Zhong 01][Gühning 01][Pagès 03][Blais 04][Su 04].

El método Phase-Shifting (PS) consiste en rellenar los huecos dentro de las franjas más finas del método binario mediante la proyección de un conjunto de patrones sinusoidales desfasados entre ellos una cantidad constante. El número mínimo de patrones que se deben proyectar son tres aunque es muy habitual el uso de un método de cuatro pasos (cuatro patrones)—en este caso con desfases típicos de $0, \frac{\pi}{2}, \pi$ y $\frac{3\pi}{2}$ radianes. De esta forma, los patrones de intensidad que se envían al proyector son,

$$I_{x,i}(u_p, v_p) = B \cos \left[\frac{2\pi}{T_x} u_p - i \frac{\pi}{2} \right] \quad (2.1)$$

y,

$$I_{y,i}(u_p, v_p) = B \cos \left[\frac{2\pi}{T_y} v_p - i \frac{\pi}{2} \right] \quad (2.2)$$

donde, $i = [0,1,2,3]$, T_x y T_y son la anchura en píxeles de las franjas, B es la modulación, que para un proyector típico corresponde a 255 niveles de gris y (u_p, v_p) corresponde a las coordenadas del píxel del proyector con fila u_p y columna v_p . Obsérvese que en (2.1) y (2.2) $I_{x,i}(u_p, v_p)$ y $I_{y,i}(u_p, v_p)$ denotan a la intensidad en el píxel (u_p, v_p) del proyector en el caso de que la dirección de

modulación de las franjas sea paralela al eje X y al eje Y del proyector respectivamente.

La intensidad recibida por la cámara al reflejarse los patrones mostrados en las expresiones (2.1) y (2.2) en el objeto a inspeccionar corresponde a,

$$I_{x,i}(u_c, v_c) = A(u_c, v_c) + B(u_c, v_c) \cos \left[\Phi_x(u_c, v_c) - i \frac{\pi}{2} \right] \quad (2.3)$$

y,

$$I_{y,i}(u_c, v_c) = A(u_c, v_c) + B(u_c, v_c) \cos \left[\Phi_y(u_c, v_c) - i \frac{\pi}{2} \right] \quad (2.4)$$

donde, $i = [0, 1, 2, 3]$, $A(u_c, v_c)$ y $B(u_c, v_c)$ corresponden a la intensidad promedio y a la modulación de las franjas recogidas en el píxel de la cámara (u_c, v_c) . Finalmente, $\Phi_x(u_c, v_c)$ y $\Phi_y(u_c, v_c)$ son la fase absoluta proyectada en el eje X e Y del proyector y recogida en el píxel (u_c, v_c) de la cámara. La fase módulo 2π ($W[\Phi]$) se calcula mediante una función arco tangente a partir de los patrones sinusoidales desfasados (expresiones (2.3) y (2.4)). La razón por la que mediante los patrones mostrados en las expresiones (2.3) y (2.4) no puedan obtenerse las fases absolutas Φ_x y Φ_y radica en el hecho de que el arco tangente es una función multivaluada que devuelve el mismo resultado para dos valores a y b con $b = a + 2\pi N$, donde a es un número real y N es un número entero. La fase módulo 2π se obtiene a partir de las expresión (2.3) y (2.4) como,

$$W[\Phi_x(u_c, v_c)] = \arctan \left(\frac{I_{x,1} - I_{x,3}}{I_{x,0} - I_{x,2}} \right) \quad (2.5)$$

$$W[\Phi_y(u_c, v_c)] = \arctan \left(\frac{I_{y,1} - I_{y,3}}{I_{y,0} - I_{y,2}} \right) \quad (2.6)$$

La fase absoluta Φ se calcula mediante la fase módulo 2π a partir del orden de las franjas. El orden se obtiene del Gray-Code y etiqueta y ordena cada franja proyectada. De esta forma, es un número entero comprendido entre 0 y el número total de franjas proyectadas. Este valor se calcula a partir del *codeword* o palabra resultante de la secuencia “luz” “no luz” del GC mediante una LUT (*Look Up Table*). Para una codificación de 3 bits mediante GC, el orden se obtiene mediante la Tabla 2.1 (véase la Figura 2.2).

GC1	0	0	0	0	1	1	1	1
GC2	0	0	1	1	1	1	0	0
GC2	0	1	1	0	0	1	1	0
N	0	1	2	3	4	5	6	7

Tabla 2.1 Cálculo del Orden de las franjas para una codificación de 3 bits mediante Gray-Code

La fase absoluta se calcula mediante,

$$\Phi_x(u_c, v_c) = W[\Phi_x(u_c, v_c)] + 2\pi N_x(u_c, v_c) \quad (2.7)$$

$$\Phi_y(u_c, v_c) = W[\Phi_y(u_c, v_c)] + 2\pi N_y(u_c, v_c) \quad (2.8)$$

En la Figura 2.3 aparece un esquema del método de codificación mediante códigos Gray y Phase-Shifting. En esta figura aparecen los tres primeros códigos Gray —patrones (1), (2) y (3) en la figura— y los cuatro patrones sinusoidales del método basado en Phase-Shifting —patrones (4), (5), (6) y (7) en la figura—. Adicionalmente en la Figura 2.3 aparece debajo de cada patrón un perfil a lo largo de la línea roja que lo cruza. En estos perfiles se muestra representada la intensidad frente al píxel. De la Figura 2.3 puede observarse el desfase existente entre los patrones del Phase-Shifting

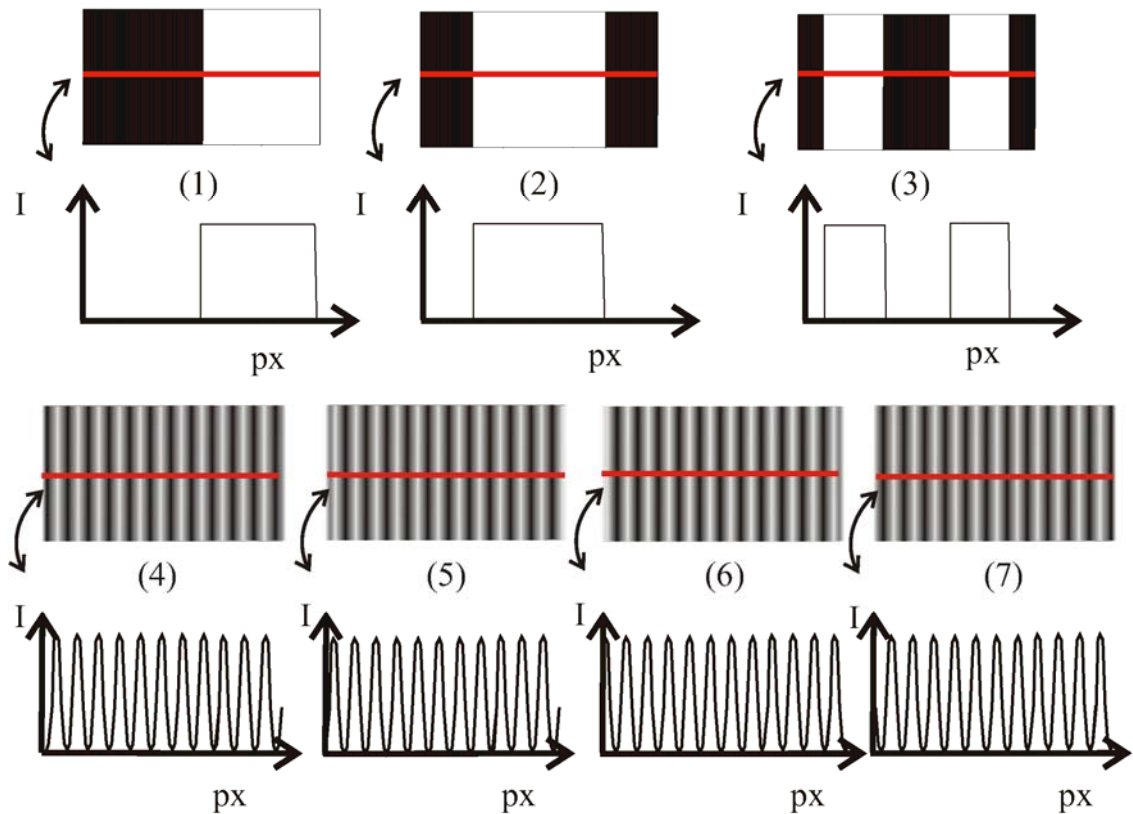


Figura 2.3 Esquema del método de codificación mediante códigos Gray y Phase-Shifting; (1), (2) y (3) corresponden a los tres primeros códigos Gray. (4), (5), (6) y (7) corresponden a los patrones de un Phase-Shifting de cuatro pasos. Debajo de cada patrón aparece un perfil de intensidad frente a píxel a lo largo de la línea roja.

En la Figura 2.4 aparece un esquema del método para obtener la fase módulo 2π (Phase-Shifting) ($W[\Phi]$). Como se observa de la Figura 2.4 mediante el método PS no es posible codificar de forma absoluta. Para conseguir una codificación absoluta, como la obtenida mediante el GC pero con una gran resolución espacial (como en el caso del método PS) se combinan ambas técnicas (GC+PS). Obsérvese que para que el método GC+PS tenga sentido la franja más fina proyectada de los patrones GC tiene que coincidir en anchura con la franja del patrón sinusoidal del PS.

En la Figura 2.5 aparece un esquema del método GC+PS. Obsérvese que en este esquema se usa una codificación de tres bits mediante el GC. De la Figura 2.5 se aprecia que del *codeword* o palabra del GC se obtiene el orden mediante la

Tabla 2.1. En la Figura 2.5 aparece el orden multiplicado por 2π . Esta magnitud se suma a la fase módulo 2π para obtener la fase absoluta.

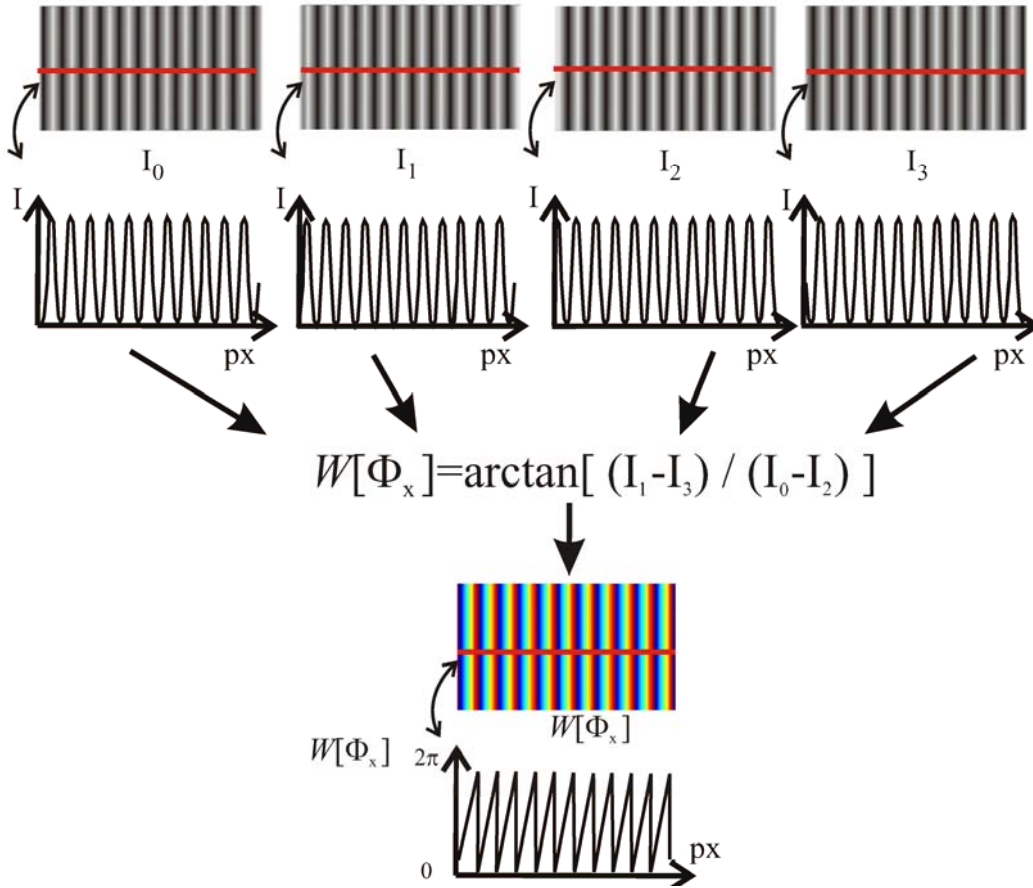


Figura 2.4 Esquema del método para obtener la fase módulo 2π , donde I_0 , I_1 , I_2 , I_3 y I_4 corresponden a los cuatro patrones sinusoidales de un Phase-Shifting de cuatro pasos. Finalmente aparece la fase módulo 2π , $W[\Phi_x]$ calculada mediante una función arco tangente.

El principal inconveniente de los métodos basados en la proyección de patrones binarios así como del método GC+PS consiste en la gran cantidad de imágenes que necesitan ser proyectadas (típicamente diez imágenes). Los códigos N -arios consideran el problema de reducir el número de patrones a proyectar incrementando el número de niveles de gris utilizados para codificar las franjas [MacWilliams 76][Morano 98]. El principal inconveniente de los métodos N -arios es que son mucho menos robustos ante el ruido que los métodos binarios y poco fiables al medir objetos oscuros.

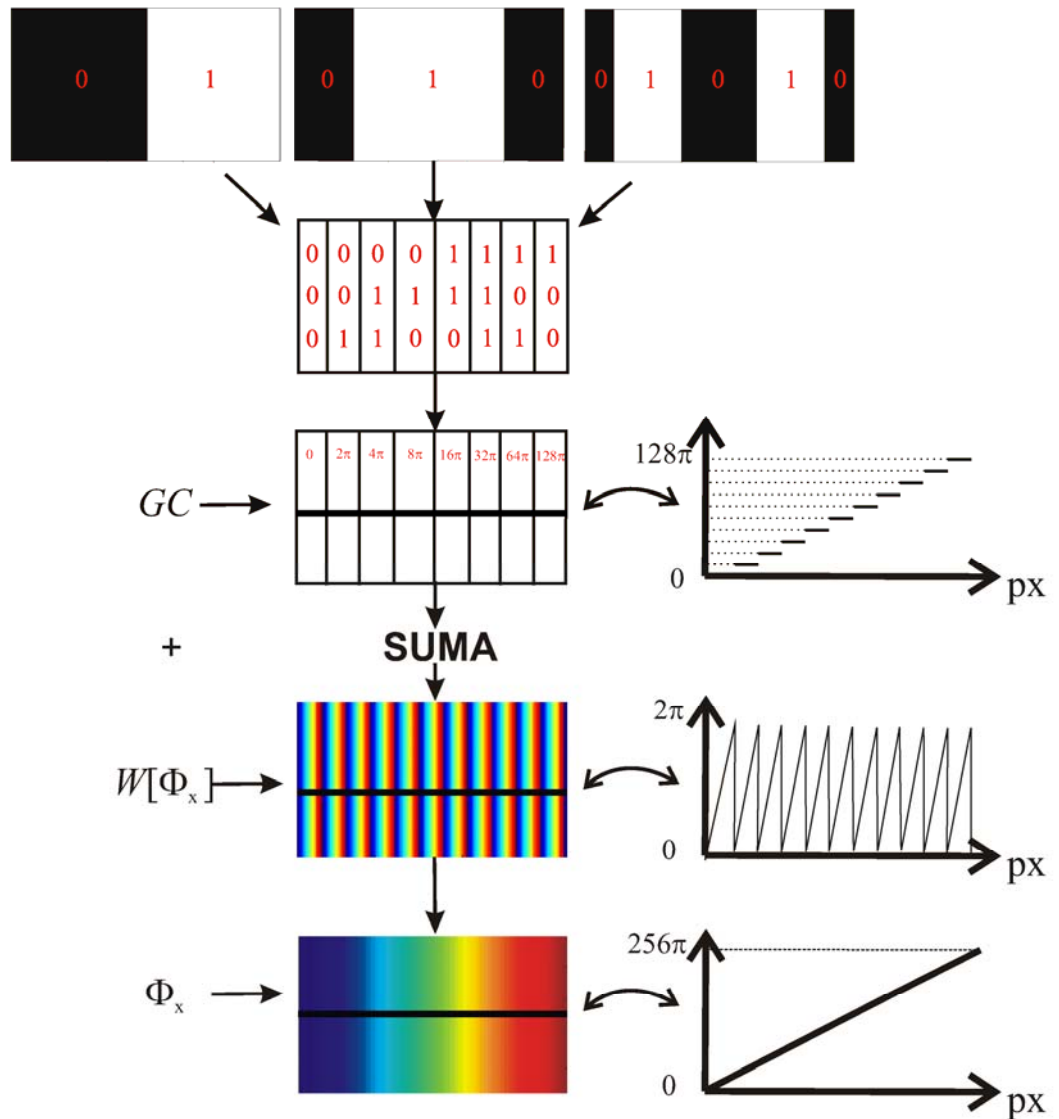


Figura 2.5 Esquema del método para obtener la fase absoluta mediante el método GC+PS

En la codificación en el dominio espacial se trata de etiquetar los puntos del objeto mediante la proyección de un único patrón. El *codeword* o palabra que identifica cada punto sobre el objeto a medir, se obtiene a partir de una vecindad del mismo. Estos métodos tienen como ventaja respecto de las técnicas de codificación temporal que pueden medir objetos que se deforman o cambian; mientras que sus inconvenientes son, en primer lugar una peor resolución espacial debido a que la información queda codificada en pequeñas ventanas alrededor de cada píxel. Por otra parte, estos métodos son muy sensibles a la presencia de

oclusiones o sombras debido a que la decodificación no es puntual sino basada en la información contenida en una región [Battle 98][Pages 03][Salvi 04].

Los métodos llamados de codificación directa están basados en la proyección de patrones en los que las coordenadas de cada uno de sus píxeles pueden ser obtenidas directamente de su intensidad proyectada [Carrihill 85][Tajima 90]. En este caso no es necesario proyectar un conjunto de patrones como en los métodos temporales ni decodificar un píxel mediante la información contenida en una pequeña vecindad alrededor de él como en los métodos espaciales. En los métodos directos la codificación se realiza o mediante un gran rango de colores distintos o introduciendo periodicidad en el patrón. En la Tabla 2.2 aparece un resumen de las principales ventajas e inconvenientes de los distintos tipos de codificación.

En la presente tesis estamos interesados en la medida 3D de objetos estáticos. En nuestro caso particular el tiempo de medida no es un factor crítico, siendo más importante la resolución y precisión de nuestras medidas. Por estas razones se ha utilizado el método GC+PS ya que es el método más robusto y con el que mejor resolución se obtiene [Salvi 04].

Técnicas de codificación	Ventajas	Inconvenientes
Dominio temporal	<ul style="list-style-type: none"> •Alta resolución espacial. •Alta precisión. •Métodos robustos frente al ruido. •Fácil implementación. 	<ul style="list-style-type: none"> •No aplicable con objetos que se mueven o escenas dinámicas. •Es necesario proyectar una gran cantidad de patrones.
Dominio espacial	<ul style="list-style-type: none"> •Es posible medir objetos móviles. •Codificación mediante un solo patrón. 	<ul style="list-style-type: none"> •Peor resolución espacial que los métodos englobados en el dominio temporal. •La decodificación es compleja. •Problemas en zonas con oclusiones o sombras.
Codificación directa	<ul style="list-style-type: none"> •Alta resolución espacial. •Son necesarios pocos patrones para codificar. 	<ul style="list-style-type: none"> •Muy sensible al ruido. •Sensible al ancho de banda limitado de los proyectores. •No aplicable con objetos que se mueven.

Tabla 2.2: Resumen de las principales ventajas e inconvenientes de los métodos de codificación mediante proyección de luz estructurada

2.2 Formación de imagen

En este subapartado se introduce brevemente el modelo de cámara (ó proyector) usado. Para una discusión más en detalle consultar el libro de referencia [HZ 00].

2.2.1 La cámara *pin-hole*

El modelo de cámara *pin-hole* consiste en simular una cámara mediante un plano imagen y una apertura infinitesimal delante de ella. Este modelo tan simple nos servirá como base para refinarlo posteriormente.

La Figura 2.6 muestra un esquema del modelo de cámara *pin-hole*. En la Figura 2.6 aparece el punto C (centro óptico), punto virtual al que convergen los rayos de luz provenientes de la escena y un plano retinal P en el cual se forma la imagen de la escena. El plano retinal está ubicado a una distancia \hat{f}_C (distancia focal en milímetros) del centro óptico C y perpendicularmente al eje óptico.

La imagen de un punto 3D arbitrario M_C , referido en el sistema de referencia de la cámara, centrado en C , se obtiene a partir de la intersección de la línea que pasa por el centro óptico C y el punto M_C , con el plano retinal P . Al punto imagen de M_C en coordenadas métricas (milímetros) le denotaremos como \hat{m}_C . Si el centro óptico C , es usado como origen único de coordenadas, con el eje Z coincidiendo con el eje óptico, entonces la proyección del punto 3D M_C en el plano retinal de la cámara viene dado por,

$$s\hat{m}_C = \begin{pmatrix} \hat{f}_C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \hat{f}_C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} M_C \quad (2.9)$$

En (2.9) tanto \hat{m}_C como M_C vienen dadas en coordenadas homogéneas [HZ 00] y están formados por $\hat{m}_C = [\hat{u}_C, \hat{v}_C, 1]^T$, $M_C = [X_C, Y_C, Z_C, 1]^T$, siendo (\hat{u}, \hat{v}) las

coordenadas métricas (en milímetros) en el plano retinal referidas respecto al punto principal, c_c (corte del eje óptico con el plano retinal).

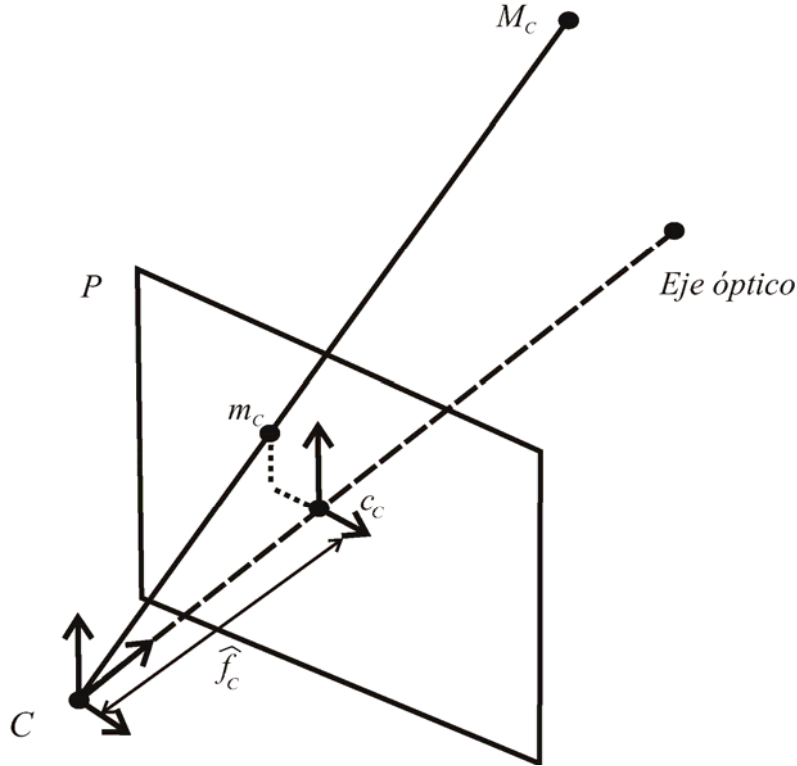


Figura 2.6 Modelo de cámara pin-hole. La imagen de un punto 3D se forma mediante proyección de perspectiva. Un punto M es proyectado a un punto m en el plano retinal P .

En (2.9) s denota a un factor de escala arbitrario. Este factor de escala aparece debido a que en la geometría proyectiva se tiene que para cualquier punto arbitrario en coordenadas homogéneas, $\hat{m}_c = [\hat{u}_c, \hat{v}_c, 1]^T = \kappa [\hat{u}_c, \hat{v}_c, 1]^T$, con κ un escalar distinto de cero. Es decir siempre existe un factor de escala arbitrario. [HZ 00]

En una cámara real, las coordenadas en el plano retinal vienen expresadas en píxeles (u, v) y no en coordenadas métricas (\hat{u}, \hat{v}) . Por otra parte los píxeles no están referidos respecto al punto principal c , sino que típicamente el origen de coordenadas está situado en el píxel superior izquierdo. Las coordenadas homogéneas en píxeles del punto principal c_c respecto del píxel superior izquierdo vienen dadas por $c_c = [c_c^x, c_c^y, 1]^T$.

En algunas cámaras puede ocurrir que los píxeles no sean rectangulares sino romboédricos; de esta forma puede aparecer una deformación caracterizada por un ángulo α (véase la Figura 2.7 (b)). Esta rombocidad o *skewness* se usa generalmente para modelar la diferencia de muestreo entre el *framegrabber* y la CCD.

En la Figura 2.7 (a) aparece un esquema del plano retinal de una cámara. En la Figura 2.7 (a) se toma como origen de coordenadas el píxel superior izquierdo; de esta forma el punto principal viene dado por unas coordenadas $c_c = [c_c^x, c_c^y, 1]^T$ y la transformación que pasa de c_c al píxel superior izquierdo es T . En la Figura 2.7 (b) aparece la rombocidad en los píxeles que puede aparecer en algunas cámaras. En la Figura 2.7 (b) d_x y d_y son las dimensiones laterales del píxel.

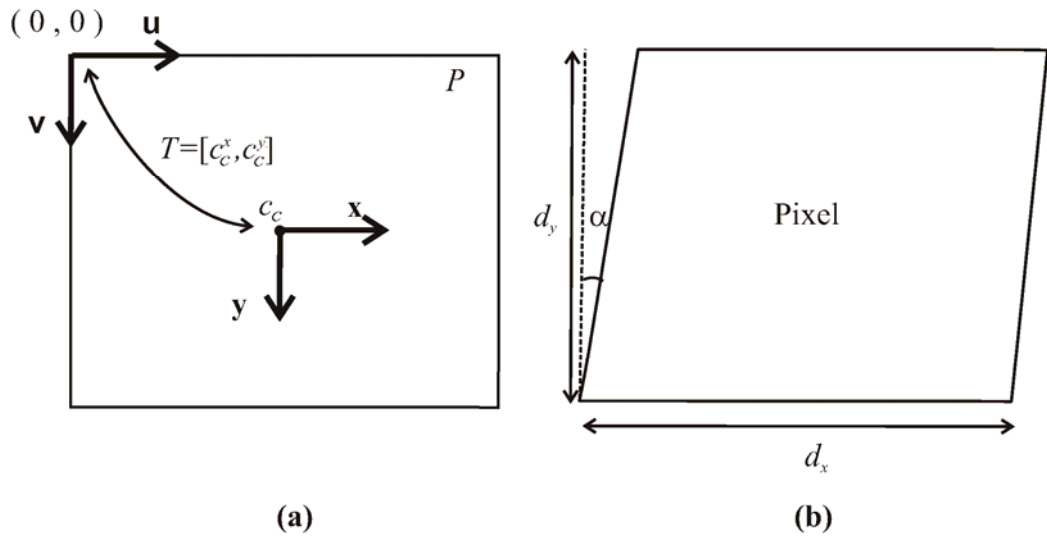


Figura 2.7 (a) plano retinal de la cámara P , donde aparece el píxel superior izquierdo que es el origen de coordenadas y el punto principal, (b) forma rómbica de los píxeles que puede aparecer en algunas cámaras, donde α corresponde al ángulo de deformación, d_x a la anchura y d_y a la altura del píxel respectivamente.

Teniendo en cuenta tanto la forma rómbica de los píxeles y expresando las coordenadas en el plano retinal de la cámara en píxeles (m_c), obtenemos la siguiente expresión,

$$sm_c = \begin{pmatrix} \frac{\hat{f}_c}{d_x} & \tan(\alpha) \frac{\hat{f}_c}{d_x} & c_c^x & 0 \\ 0 & \frac{\hat{f}_c}{d_y} & c_c^y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} M_c \quad (2.10)$$

En (2.10) s es un factor de escala arbitrario. La expresión (2.10) suele aparecer en la literatura como,

$$sm_c = \begin{pmatrix} f_c^x & 0 & c_c^x & 0 \\ 0 & f_c^y & c_c^y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} M_c \quad (2.11)$$

donde se ha considerado que los píxeles son perfectamente rectangulares (es decir, α igual a cero en la expresión 2.10), que es el caso habitual y se han definido dos distancias focales dependientes de la dirección, f_c^x y f_c^y . Estas distancias focales vienen expresadas en píxeles.

En la expresión (2.11) se ha considerado que existe un único sistema de referencia (sistema de referencia de la cámara), centrado en el centro óptico o centro de proyección. Tanto la cámara como los puntos 3D $M_c = [X_c, Y_c, Z_c, 1]^T$ están referidos respecto a este sistema de referencia. No obstante, en los casos reales los puntos 3D estarán referidos en un sistema de referencia arbitrario, conocido como sistema de referencia del mundo (*S.R.M*). De esta forma para determinar la proyección de los puntos 3D en el plano retinal de la cámara, inicialmente hay que transformar estos puntos al sistema de referencia de la cámara para seguidamente aplicar una transformación como la mostrada en (2.11). La transformación que relaciona el sistema de referencia del mundo con el sistema de referencia de la cámara viene dada por una matriz de rotación y un vector de translación R_c y \mathbf{t}_c ; donde R_c es una matriz de rotación 3×3 y \mathbf{t}_c es un vector de translación 3×1 . En la Figura 2.8 aparece la proyección de un conjunto de puntos 3D referidos en el sistema de referencia del mundo (*S.R.M*) al

plano retinal de la cámara. La proyección de un punto 3D referido en un sistema de referencia arbitrario podemos modelarla como,

$$sm_C = K_C [R_C | \mathbf{t}_C] M_W = \begin{pmatrix} f_C^x & 0 & c_C^x \\ 0 & f_C^y & c_C^y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} [R_C | \mathbf{t}_C] M_W \quad (2.12)$$

En la expresión (2.12) s es un factor de escala indeterminado, K_C es una matriz 3×3 llamada matriz de intrínsecos o de parámetros internos y $[R_C | \mathbf{t}_C]$ es una matriz 3×4 llamada matriz de extrínsecos.

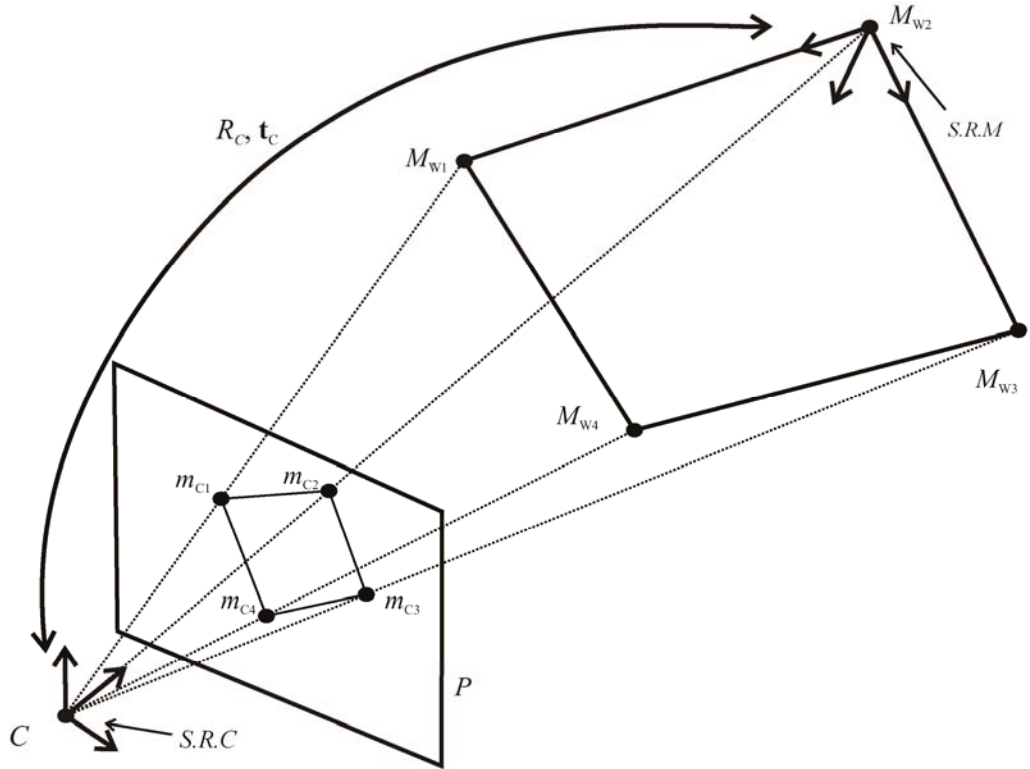


Figura 2.8 Proyección de un conjunto de puntos 3D referidos en el sistema de referencia del mundo ($S. R. M$) al plano retinal de la cámara. En la Figura 2.6 R_C y \mathbf{t}_C son la matriz de rotación y el vector de traslación, que relacionan el sistema de referencia del mundo ($S.R.M$) con el sistema de referencia de la cámara ($S.R.C$)

2.2.2 La cámara *pin-hole* con distorsión

El modelo de cámara pin-hole, que se ha introducido en el subapartado anterior no es aplicable para modelar cámaras reales de forma precisa. Este modelo asume que los rayos formadores de imagen siguen trayectorias rectilíneas desde los puntos del objeto hasta el centro óptico. Las cámaras reales poseen un sistema óptico (objetivo) cuya finalidad es enfocar los rayos de luz sobre la CCD y condensar la mayor cantidad de luz en el plano retinal. Incluso en las cámaras más sofisticadas la imagen formada por este sistema óptico esta afectada por aberraciones que hacen que no sea preciso aplicar un modelo basado en rayos rectilíneos —modelo paraxial—. Estas aberraciones o efectos no paraxiales aparecen cuando rayos alejados del eje óptico forman imagen y no es preciso aproximar $\sin(\theta) \cong \theta$ en la ley de la refracción. Al aproximar el seno mediante $\sin(\theta) \cong \theta - \frac{\theta^3}{3!}$ en la ley de la refracción aparecen las llamadas aberraciones de Seidel o de tercer orden [Born 97]. Estas aberraciones de Seidel se clasifican en aberración esférica, coma, astigmatismo, curvatura de campo y distorsión (radial). Todas estas aberraciones salvo la distorsión radial provocan fundamentalmente una pérdida de nitidez en la imagen causando que la imagen de un punto sea una mancha. La distorsión sin embargo, deforma la imagen geoméricamente, introduciendo un error sistemático. En este caso la imagen de un punto es un punto pero situado en una posición distinta en el plano retinal. De esta forma, en la modelización de una cámara solo se considera la distorsión como la única fuente de error debido a las aberraciones.

A parte de la distorsión radial, para la precisa modelación de una cámara, hay que considerar también la distorsión tangencial, que aparece en sistemas ópticos no perfectamente alineados. La distorsión radial puede ser modelada mediante un polinomio impar de grado cinco con dos coeficientes [Heikkiä 97]. El primer coeficiente (orden tercero) corresponde al término de distorsión de las aberraciones de Seidel mientras que el siguiente orden (orden quinto) se corresponde con el siguiente término de aberración que proviene de aproximar

$\sin(\theta) \cong \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!}$. La distorsión tangencial se modela mediante un polinomio

de segundo orden con dos coeficientes [Heikkiä 97]. Teniendo en cuenta estas distorsiones la expresión (2.4) se reescribe como,

$$sm_c = K_c D\{N(M_c)\} \quad (2.13)$$

donde, $M_c = [R_c | \mathbf{t}_c] M_w$ y por tanto $M_c = [X_c, Y_c, Z_c, 1]^T$. Por otra parte la función $N(M_c)$ en (2.13) corresponde a la operación de normalización, que viene dada por

$$N(M_c) = \left[\frac{X_c}{Z_c}, \frac{Y_c}{Z_c}, 1 \right]^T \quad (2.14)$$

donde las coordenadas normalizadas vienen dadas por,

$$[x_n, y_n, 1]^T = \left[\frac{X_c}{Z_c}, \frac{Y_c}{Z_c}, 1 \right]^T. \quad (2.15)$$

Finalmente la función D, introduce la distorsión radial y tangencial, sobre las coordenadas normalizadas. Las coordenadas distorsionadas vienen dadas por,

$$[x_d, y_d, 1]^T = \begin{pmatrix} (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) x_n + 2p_1 x_n y_n + p_2 (r^2 + 2x_n) \\ (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) y_n + p_1 (r^2 + 2y_n) + 2p_2 x_n y_n \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

donde $r^2 = (x_n^2 + y_n^2)$.

Para visualizar el efecto sobre una imagen de la distorsión radial y tangencial se ha representado un conjunto de puntos, así como las líneas que los unen, antes y después de ser afectados por la distorsión radial o tangencial. Las coordenadas x_d, y_d tienen unos valores comprendidos entre [-0.1, 0.1] debido a que son valores típicos. Los resultados pueden verse en la Figura 2.9.

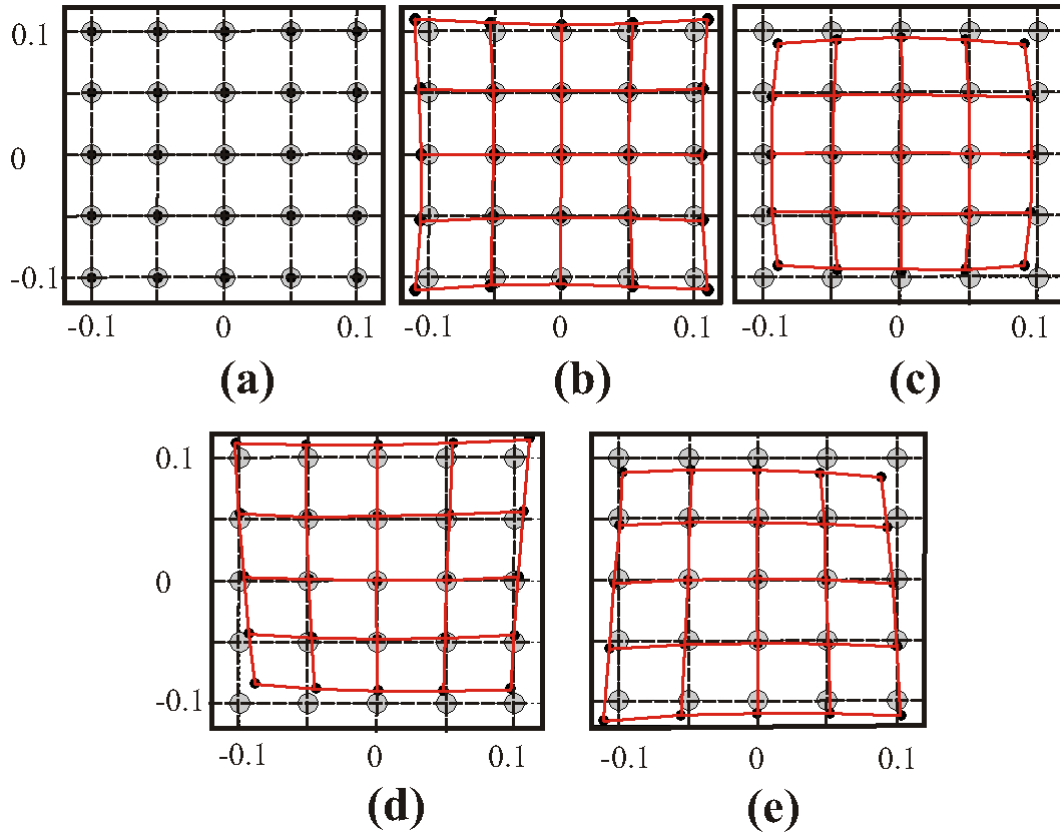


Figura 2.9 Modificación de la posición de un conjunto de puntos debido a la distorsión radial y tangencial. Los puntos grises son los puntos sin distorsionar mientras que los negros son los puntos tras ser distorsionados. En (a) no hay distorsión. En (b) se introduce una distorsión radial $k_1 = 5$, $k_2 = 0$. En (c) se introduce una distorsión radial $k_1 = -5$, $k_2 = 0$. En (d) se introduce una distorsión tangencial $p_1 = 0.3$, $p_2 = 0$. En (e) se introduce una distorsión tangencial $p_1 = -0.3$, $p_2 = 0$.

En la Figura 2.9 (b) puede verse la distorsión radial llamada usualmente de barril (distorsión radial que aparece cuando $k_1 > 0$) y en (c) la distorsión radial de corsé cuando $k_1 < 0$).

Finalmente estas coordenadas distorsionadas $[x_d, y_d, 1]^T$ se proyectan en el plano retinal de la cámara,

$$sm_C = K_C [x_d, y_d, 1]^T \quad (2.17)$$

2.2.3 Proyectores de luz

Un proyector de luz puede considerarse como una cámara inversa, en el sentido de que proyecta en vez de recoger luz. No obstante el hecho de poder aplicar un modelo *pin-hole* a un proyector no parece tan evidente como en el caso de una cámara. Seguidamente se va a hacer un brevísimo esquema de las distintas técnicas de proyección en un proyector.

Actualmente las tecnologías más implantadas en la proyección de luz son DLP (Digital Light Processing), LCD (Liquid Crystal Display) y LCos (Liquid Cristal on Silicon). La tecnología DLP está basada en un modulador óptico digital llamado DMD (Digital Micromirror Device). El DMD está formado por un array de espejos microscópicos. Una señal digital puede cambiar la orientación de cada uno de estos espejos, existiendo dos orientaciones de trabajo. En la posición “*on*”, el espejo refleja la luz y aparece iluminado. En la posición “*off*”, el espejo está desalineado y aparece oscuro. Cada uno de estos espejos puede cambiar del estado “*on*” al “*off*” con una frecuencia de aproximadamente 10^3 Hz. Variando el tiempo en que un espejo está en el estado “*on*” y “*off*” se consiguen los distintos niveles de gris para un píxel proyectado. El color se puede introducir de dos formas. La forma más habitual es mediante una rueda de color. Usando una rueda de color únicamente se necesita un chip DMD. Esta ruleta de color al girar proyecta luz roja, azul y verde sobre el chip DMD. Los estados “*on*” y “*off*” del DMD están sincronizados con la rueda de tal forma que se consigue una imagen en color al integrar en el tiempo. Obsérvese que la frecuencia de refresco que es capaz de percibir el ser humano es mucho mas baja que la frecuencia con la que cambian las imágenes proyectadas, por lo que nuestro cerebro integra temporalmente las imágenes y de esta forma se observa una imagen en color. Otra posibilidad de introducir el color es mediante el uso de tres chips DMD dedicados cada uno a un color distinto —rojo, verde y azul—. La Figura 2.10 muestra una representación del esquema de proyección mediante un único chip DLP. Como puede verse en la Figura 2.10 en la modelización de un proyector los únicos elementos importantes son el DMD y la lente proyectora. El DMD a todos los efectos es similar al plano retinal de una CCD y la lente proyectora al objetivo de

la cámara. La validez del modelo *pin-hole* para un proyector DLP basado en ruleta de color depende únicamente de la pupila de entrada de la lente proyectora.

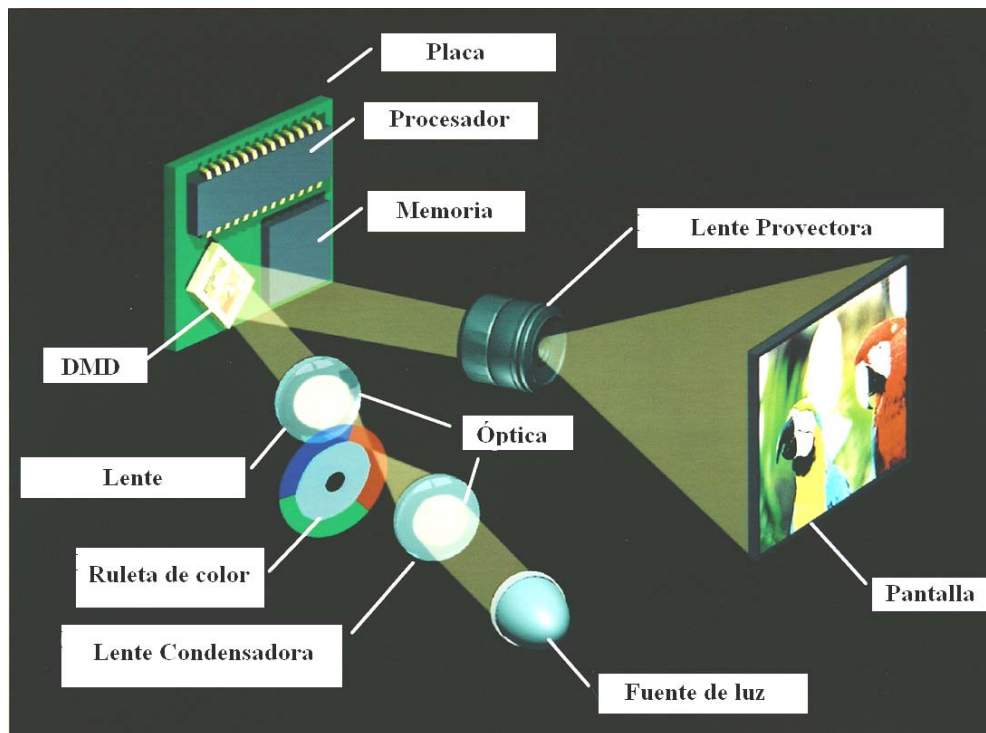


Figura 2.10 Esquema de un proyector DLP basado en ruleta de color (<http://www.ti.com/dsp/>).

La Figura 2.11 muestra una representación de un proyector DLP basado en tres chips DMD. En este caso como en el caso anterior la validez del modelo *pin-hole* en un proyector solo depende de la pupila de entrada de la lente proyectora.

En el caso de la tecnología LCD la luz pasa dos polarizadores cruzados y un cristal líquido entre ellos. Cuando la luz pasa por estos paneles cada uno de los píxeles del LCD puede transmitir o cerrar el paso de la luz. La modulación de la luz se realiza mediante la aplicación de un voltaje. Los proyectores basados en la tecnología LCD generalmente contienen tres paneles, uno para modular el color rojo, otro para el verde y otro para el azul. La Figura 2.12 muestra un esquema de un proyector LCD.

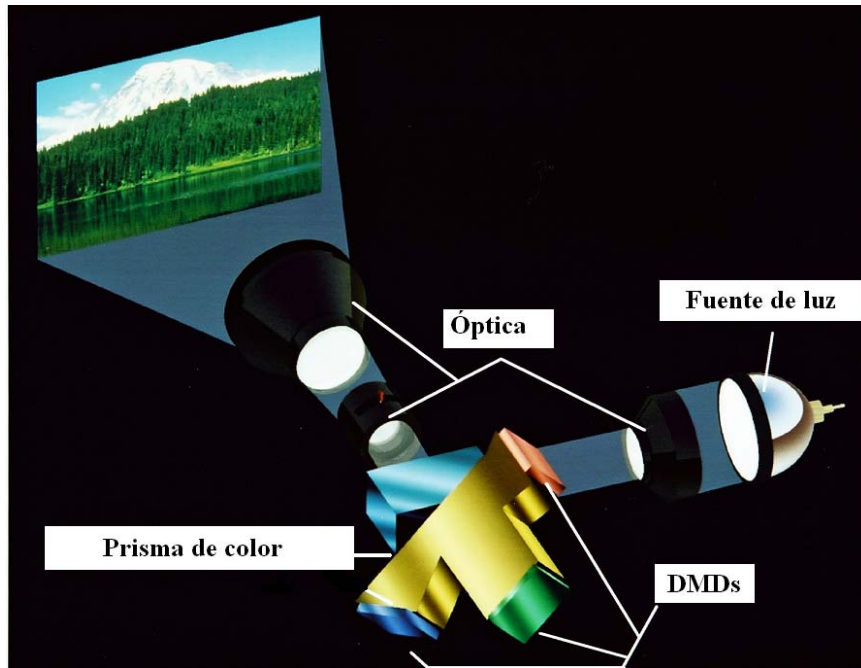


Figura 2.11 Esquema de un proyector DLP basado en tres chips DMDs dedicado. (<http://www.ti.com/dsp/>).

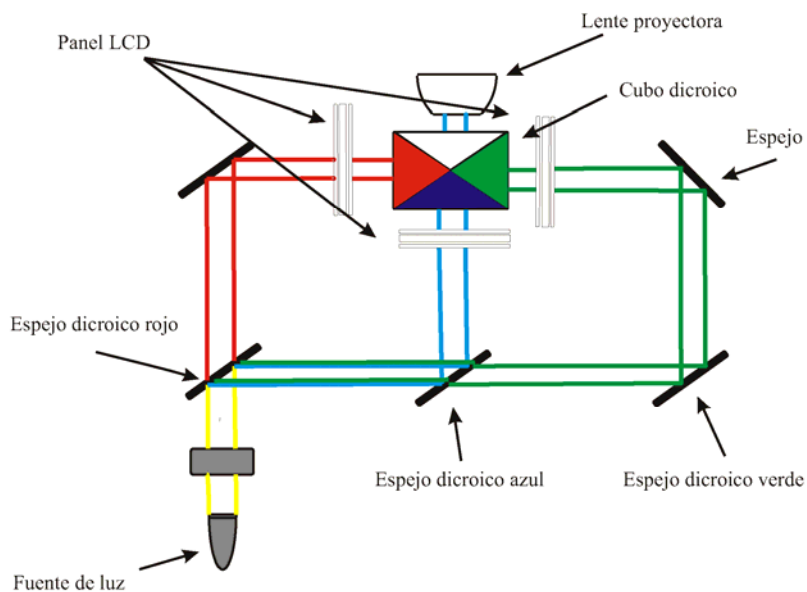


Figura 2.12 Esquema de un proyector LCD basado en tres paneles LCD

En la Figura 2.12 se observa como los distintos espejos dicróicos separan los colores rojo, verde y azul. Un modulador de luz basado en cristal líquido actúa sobre cada color. Finalmente un cubo dicróico combina todos los colores y una lente proyecta el haz de luz. Al igual que en los casos anteriores, la pupila de

entrada de la lente proyectora es el parámetro que establece la validez del modelo *pin-hole* aplicado al proyector.

La tecnología de proyección basada en LCos (Liquid Cristal on Silicon) puede considerarse como una tecnología híbrida entre las tecnologías DLP y LCD. Comparte con la tecnología LCD el hecho de que está basada en el uso de cristales líquidos como moduladores de luz, no obstante no es una tecnología de transmisión como esta; al igual que en la tecnología DLP los proyectores LCos están basados en una tecnología de reflexión. La tecnología LCos utiliza un panel de cristal líquido sobre un sustrato de silicio que tiene depositado una superficie reflectante. La proyección de luz mediante LCos es idéntico al usado con una tecnología DLP cambiando el chip (o chips) DMD por el panel (o paneles) de cristal líquido sobre silicio, Figura 2.10 y Figura 2.11. La modelización de un proyector basado en LCos mediante un modelo *pin-hole* depende al igual que en el caso DLP de la pupila de entrada de la lente proyectora.

2.3 Calibración de un sistema 3D

Para obtener una medida tridimensional en coordenadas absolutas es necesaria la calibración previa del sistema de medida. Para la calibración de un sistema de medida 3D mediante luz estructurada existen fundamentalmente dos procedimientos: los métodos llamados de calibración directa [Brenner 98][Gühring 00][Liu 03][Xiaoling 05][Jin 06][Jia 07] y los métodos basados en ajuste a modelo, también llamados fotogramétricos [Sansoni 99][Legarda 04][Knyaz 04][Zheng 04][Da 08].

En [Brenner 98] se muestra una comparación entre un método de calibración directa y un método basado en ajuste a modelo. Para realizar la comparación de los métodos, se mide una superficie con el mismo sistema 3D calibrado mediante los dos métodos. Se observa en los resultados de dicho trabajo que el método directo es más preciso que el método basado en ajuste a modelo.

En este apartado se da una explicación introductoria y muy resumida de los métodos de calibración de un sistema de medida 3D. Para un análisis más detallado ver el Capítulo 3.

2.3.1 Métodos de calibración directa

En la calibración de un sistema 3D mediante un método directo un plano con marcas se sitúa sucesivamente en distintas posiciones equidistantes conocidas Z_i respecto de la cámara. Una marca del plano situado en la primera posición Z_0 suele utilizarse como origen de coordenadas del sistema de referencia del mundo ($S.R.M$). Los distintos planos Z_i se eligen paralelos al primer plano Z_0 . Para cada píxel de la cámara y para cada plano de calibración Z_i se obtiene una medida de la fase absoluta Φ_i (medida resultante de aplicar el método GC+PS, véase el apartado 2.1). Las posiciones 3D de las marcas sobre el plano de calibración respecto del sistema de referencia del mundo ($S.R.M$) (definido anteriormente) se conocen para las distintas posiciones de los planos. Por una parte las coordenadas de profundidad Z_i de estas marcas coinciden con las distintas posiciones conocidas de los planos. Por otra parte, las coordenadas laterales de las marcas, (X_i, Y_i) se conocen por construcción del plano y porque los distintos planos se mueven paralelamente. Los conjuntos de pares (Φ_i, X_i) , (Φ_i, Y_i) , (Φ_i, Z_i) pueden ajustarse utilizando una función arbitraria para describir la relación entre la fase absoluta y las coordenadas tridimensionales. En el trabajo de Liu et al [Liu 03] se muestra que la relación existente entre fase absoluta y la profundidad puede modelarse mediante un polinomio de orden bajo. El ajuste a estas funciones arbitrarias se realiza midiendo la fase absoluta para una gran cantidad de planos de calibración dentro del volumen de trabajo. Los desplazamientos de estos planos de calibración respecto del primer plano —origen de coordenadas del mundo— se tienen que medir con mucha precisión; por esta razón estos métodos necesitan utilizar posicionadores lineales muy precisos. Una vez que se ha medido para cada píxel un conjunto suficientemente extenso de puntos fase-coordenadas 3D, es posible realizar el ajuste a las funciones arbitrarias de calibración. Con las funciones arbitrarias de calibración determinadas, se puede

obtener una reconstrucción tridimensional de un objeto midiendo sobre este la fase absoluta.

Un esquema puede verse en la Figura 2.13. En la Figura 2.13(a) aparecen las intersecciones de las distintas cuchillas de luz proyectadas con los distintos planos de calibración y con las líneas de vista partiendo de la cámara. Cada cuchilla de luz posee un valor distinto de la fase absoluta. Para cada píxel de la cámara se adquiere la fase absoluta en los distintos planos de calibración paralelos y colocados en posiciones conocidas. Al representar para un píxel de la cámara la fase absoluta medida para cada posición del plano se obtiene una representación como la Figura 2.13 (b). La relación entre la fase absoluta y la coordenada de profundidad se modela mediante polinomios de orden bajo. En los métodos directos se calibra cada píxel de la cámara de forma independiente al resto y sin la determinación explícita de ningún parámetro geométrico del sistema.

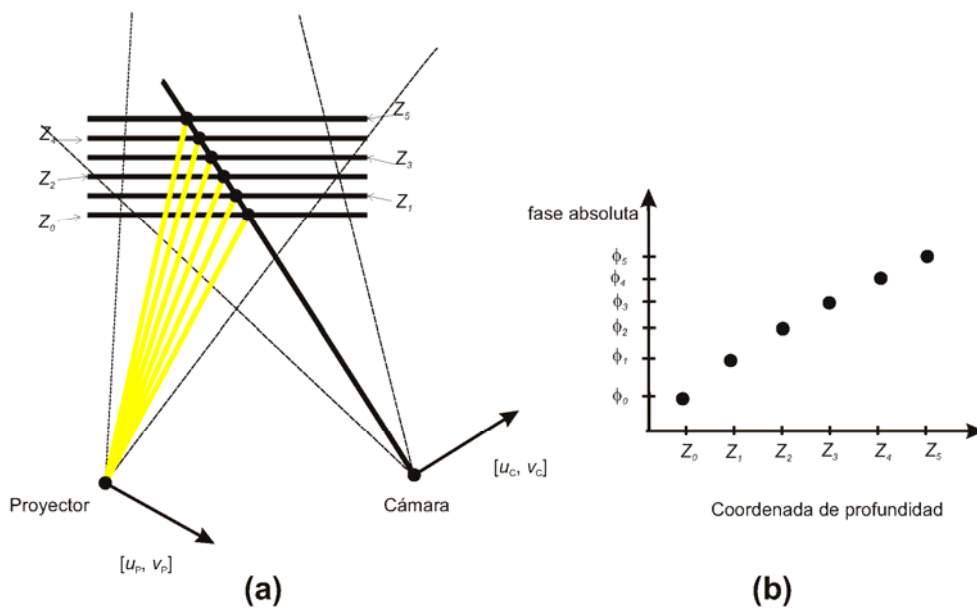


Figura 2.13 Esquema del método directo de calibración, En (a) se muestra la proyección de la fase absoluta sobre los distintos planos paralelos de calibración. La distancia entre los planos de calibración se mide con mucha precisión. En (b) se representa aproximadamente la relación existente entre fase absoluta y coordenada de profundidad.

2.3.2 Métodos de calibración basados en modelo

Los métodos de calibración fotogramétricos están fundamentados en el ajuste de la cámara y del proyector a un modelo determinado. Como ya se ha discutido en los apartados 2.2.2 y 2.2.3 tanto la cámara como el proyector pueden modelarse como una cámara *pin-hole* con distorsión.

Calibración de una cámara

Para realizar la calibración de la cámara suelen utilizarse dos métodos fundamentalmente, el método de Tsai [Tsai 87] o el método de Zhang [Zhang 99].

El método de calibración de Tsai ajusta la cámara a un modelo *pin-hole* con distorsión radial de primer orden. Este método puede llevarse a cabo mediante puntos 3D coplanares o no coplanares. Típicamente se usa un objeto 3D con geometría conocida, como un cubo cubierto con marcas colocadas en posiciones conocidas. Estas marcas son detectadas en el plano imagen de cámara a calibrar. Esto proporciona un conjunto de coordenadas 3D-2D correspondientes. El método de Tsai inicialmente obtiene una estimación lineal de los parámetros de calibración que realiza mediante una serie de restricciones geométricas; para ello utiliza una técnica basada en dos escenarios. En un primer paso se computa la orientación y posición de la cámara respecto del sistema de referencia del mundo. Seguidamente a partir de la estimación de la orientación y posición de la cámara, se obtienen los parámetros intrínsecos de la cámara. Tras la estimación inicial de los parámetros, estos parámetros son refinados mediante una optimización no lineal minimizando el error de retroproyección.

El error de retroproyección en la calibración una cámara se define como la distancia geométrica en píxeles que existe entre la proyección de un punto 3D (M_w) en el plano imagen de la cámara usando los parámetros de calibración, y la posición de la imagen del punto (M_w) medida directamente del plano imagen (m_c). Matemáticamente el error de proyección viene dado por

$$\left| m_c - K_c D \{ N([R_c | t_c] M_w) \} \right|^2.$$

Obsérvese que por una parte las coordenadas 3D del punto M_w tienen que conocerse a priori para que el error de retroproyección pueda calcularse. Por otra parte, el error de proyección se define de forma similar para el caso de la calibración de un proyector. En este caso, la definición matemática del mismo viene dada por $\|m_p - K_p D\{N([R_p | t_p]M_w)\}\|^2$.

El resultado del proceso de calibración son los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara, así como el coeficiente de distorsión radial k . El método de Tsai asume que hay ciertos parámetros que tienen que ser proporcionados por el fabricante, esto reduce el número de parámetros a calibrar en el primer escenario, aunque puede dar lugar a resultados poco precisos o erróneos si no se dispone de valores exactos o no se dispone de estos en absoluto.

El método de calibración de Zhang requiere que la cámara observe un plano con marcas en al menos dos posiciones arbitrarias distintas. Las posiciones de las marcas en el plano de calibración son conocidas. Estas marcas son detectadas en el plano imagen de la cámara a calibrar. Esto proporciona, un conjunto de coordenadas 3D-2D correspondientes para cada plano. Es importante hacer notar que cada plano de calibración tiene asociado un sistema de referencia con el eje Z paralelo a la normal del plano de calibración. Este sistema de referencia suele situarse en alguna marca característica.

En la Figura 2.14 se muestra tres planos de calibración con marcas situados en distintas posiciones y orientaciones respecto de la cámara. Las marcas de cada plano están posicionadas de forma precisa respecto de una marca característica, que sirve de origen de coordenadas para cada plano.

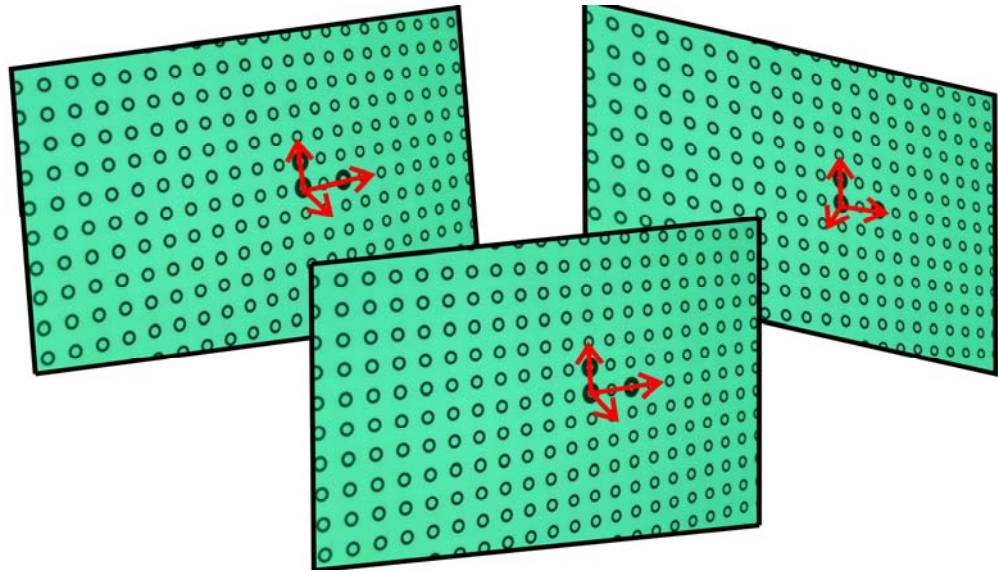


Figura 2.14 Planos de calibración con marcas situados en distintas posiciones y orientaciones usados en el método de calibración de Zhang

Para la calibración de una cámara mediante el método de Zhang, inicialmente se calculan las matrices de proyección —homografías— que transforman las coordenadas 3D de las marcas sobre los planos de calibración al plano imagen de la cámara. Estas homografías se calculan mediante el método DLT (*Direct Linear Transformation*) [HZ 00]. Una vez obtenidas las homografías se adquieren a partir de dos restricciones geométricas una estimación analítica de los parámetros intrínsecos y extrínsecos. Seguidamente se procede a realizar una primera optimización no-lineal para finalmente realizar una última optimización teniendo en cuenta la distorsión de la lente. Las optimizaciones no-lineal se realizan mediante el algoritmo de Levenberg-Marquardt que se basa en minimizar el error de retroproyección entre las imágenes de las marcas en el plano imagen de la cámara y las obtenidas mediante el modelo de cámara. La distorsión radial se modela mediante dos coeficientes (k_1 y k_2).

Calibración de un proyector

Un proyector se calibra usando los mismos algoritmos de calibración que una cámara ya que puede considerarse como una “cámara inversa”. Sin embargo como el proyector no “ve” el método no es tan directo como en el caso de una cámara. Para la calibración de un proyector es inevitable el uso al menos de una cámara. Para calibrar un proyector, ya sea usando el método de Tsai [Tsai 86], como el método de Zhang [Zhang 99] es necesario obtener un conjunto de coordenadas 3D-2D ($M_{w_i} - m_{p_i}$) correspondientes. Las coordenadas m_{p_i} pueden determinarse usando una cámara situada en una posición arbitraria. Dicha cámara no tiene que estar calibrada. El método consiste en proyectar con el proyector sobre el plano de calibración con marcas dos fases absolutas (por ejemplo, mediante el método PS + GC explicado en la sección 2.1), una paralela al eje X (Φ_x) y otra al eje Y (Φ_y) del proyector. Dichas fases absolutas (Φ_x y Φ_y) se miden para cada píxel de la cámara. Si denotamos por $\Phi_x(m_c)$ y $\Phi_y(m_c)$ las fases absolutas en el punto imagen de la cámara m_c , las coordenadas del proyector vienen dadas por

$$(u_p, v_p) = \left(\frac{\Phi_x T_x}{2\pi}, \frac{\Phi_y T_y}{2\pi} \right) \quad (2.18)$$

Con T_x y T_y la anchura en píxeles en los ejes X e Y de la franja proyectada en el método Phase-Shifting en el plano retinal del proyector y $m_p = [u_p, v_p, 1]^T$.

Una vez determinadas las correspondencias M_{w_i} (conocido) m_{p_i} (medido) es posible utilizar los métodos de calibración de una cámara para la calibración del proyector.

2.4 Reconstrucción 3D

Con el sistema cámara-proyector calibrado, es posible obtener una medida 3D de un objeto arbitrario a partir de las correspondencias entre los planos retinales de la cámara y el proyector.

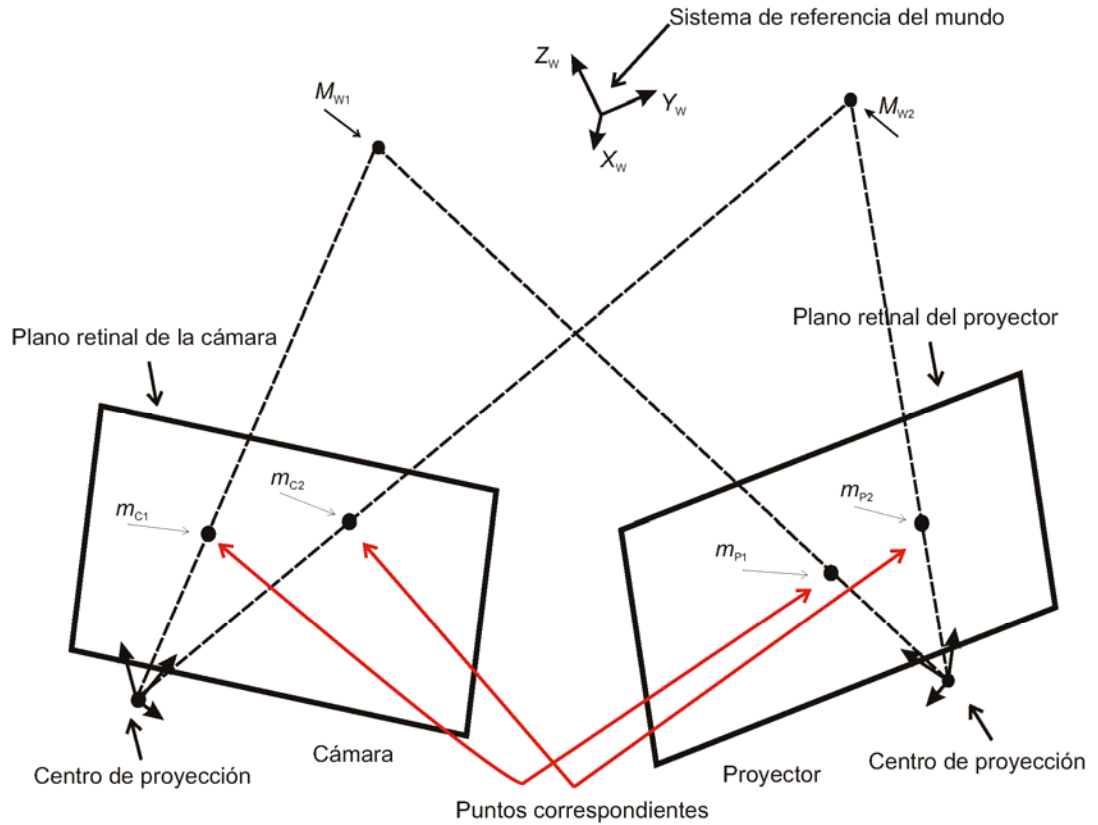


Figura 2.15 Obtención de los puntos 3D a partir de las correspondencias entre la cámara y el proyector. Los puntos correspondientes en el plano retinal de la cámara y del proyector $m_{C1}-m_{P1}$ y $m_{C2}-m_{P2}$, son retroproyectados para obtener los puntos 3D correspondientes

Las correspondencias $m_C - m_P$ se determinan de forma inmediatamente mediante la técnica de codificación GC+PS o mediante cualquier otro método de codificación (apartado 2.1) Por otra parte del modelo de formación de imagen explicado en la sección 2.2 tenemos que,

$$sm_C = P_C M_W \quad (2.19)$$

donde $m_C = [u_C, v_C, 1]$, $M_W = [X_W, Y_W, Z_W, 1]$ y P_C la matriz de proyección que relaciona los puntos 3D referidos en el sistema del mundo con los puntos 2D en el plano retinal de la cámara. Para el proyector tenemos,

$$sm_P = P_P M_W \quad (2.20)$$

con $m_P = [u_P, v_P, 1]$ y P_P la matriz de proyección del proyector. Obsérvese que los factores de escala en las expresiones (2.11) y (2.12) son desconocidos y en general distintos.

Debido a que $su_C = P_C^1 M_W$ y $s = P_C^3 M_W$, con P_C^n la n^{th} fila de P_C , es posible eliminar el factor de escala s , para la cámara como para el proyector,

$$\begin{aligned} (P_C^3 M_W)u_C &= P_C^1 M_W & (P_C^3 M_W)v_C &= P_C^2 M_W \\ (P_P^3 M_W)u_P &= P_P^1 M_W & (P_P^3 M_W)v_P &= P_P^2 M_W \end{aligned} \quad (2.21)$$

La expresión (2.21) puede reescribirse en forma matricial como,

$$AM_W = 0 \quad (2.22)$$

con la matriz A ,

$$A = \begin{pmatrix} u_C P_C^3 - P_C^1 \\ v_C P_C^3 - P_C^2 \\ u_P P_P^3 - P_P^1 \\ v_P P_P^3 - P_P^2 \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

De esta forma, usando (2.23) un punto 3D arbitrario M_W puede ser obtenido a partir de m_C , m_P , P_C y P_P como el vector nulo de la matriz A , que puede ser calculado mediante una descomposición SVD [HZ 00].

Capítulo 3

Método mixto de calibración

“No puede impedirse el viento, pero pueden construirse molinos”

Proverbio holandés

“La unión hace la fuerza”

Esopo

En este capítulo se presenta un nuevo método de calibración para un sistema de triangulación activa mediante proyección de franjas. Las técnicas estándar de

calibración de sistemas de triangulación activa tienen limitaciones que las hacen inadecuadas desde un punto de vista práctico. Algunos ejemplos son la calibración de grandes volúmenes o la necesidad de usar posicionadores lineales precisos en los métodos directos de calibración. En los métodos basados en modelo el principal inconveniente se presenta por la necesidad de realizar optimizaciones no-lineales.

En este capítulo se propone un método de calibración que es una mezcla de los dos métodos principales existentes y está basado en la proyección de una fase absoluta sobre un plano con marcas situado en posiciones desconocidas. Los resultados experimentales que comparan el método propuesto con el método de calibración estándar más preciso (método directo) muestran la validez de la técnica propuesta. El trabajo presentado en este capítulo ha dado lugar a una publicación referenciada [Vargas 07].

3.1 Introducción

Para obtener una medida 3D mediante un sistema de triangulación activa es necesario realizar una calibración previa del sistema. Las magnitudes que se miden mediante un sistema de este tipo son coordenadas bidimensionales en píxeles y fase absoluta. Por tanto, en un sistema de triangulación activa las

coordenadas 3D se obtienen de forma indirecta. Las coordenadas en píxeles y la fase absoluta contienen la información tridimensional del objeto a medir, pero es necesario utilizar una calibración para decodificar dicha información. En el Capítulo 2 se introdujo de forma muy resumida los dos métodos fundamentales de calibración: Directo (también llamado Polinomial) y basado en Modelo (también llamado fotogramétrico). En este capítulo se van a explicar estos dos métodos en profundidad además de introducir un nuevo método de calibración mixto.

Cualquier método de calibración necesita reconocer, identificar y localizar un conjunto de marcas características sobre el objeto de calibración, como un plano con marcas. El éxito o el fracaso del proceso de calibración está en gran medida asociado a la correcta identificación de las marcas así como a la precisión con la que estas marcas son localizadas en el plano imagen de la cámara y del proyector.

3.1.1 Reconocimiento, Identificación y Localización de marcas

Para la calibración de un sistema de medida 3D mediante una cámara y un proyector es necesario la utilización de un objeto especial, que puede ser un objeto tridimensional o un plano de calibración. En ambos casos estos objetos tienen un conjunto de marcas en posiciones conocidas. Para determinar los parámetros de calibración es preciso obtener las coordenadas en píxeles de las proyecciones de estas marcas en los planos retinales de cámara y proyector. En el caso de la cámara el proceso es sencillo y consiste en dos pasos. En el caso del proyector el proceso es ligeramente más complejo debido a que es necesario el uso de una cámara auxiliar.

El proceso de identificación de las marcas en el plano imagen de una cámara consiste en dos pasos. Inicialmente se detectan y localizan las marcas para que en un segundo paso sean identificadas y ordenadas. Los objetivos del proceso de detección e identificación de marcas son:

- No detectar falsas marcas

- El algoritmo debe de ser robusto frente al ruido
- La localización debe de ser precisa (subpixel)

En la Figura 3.1 se muestran el proceso de detección y ordenamiento para dos tipos de marcas distintas usadas a lo largo de la presente memoria de tesis doctoral.

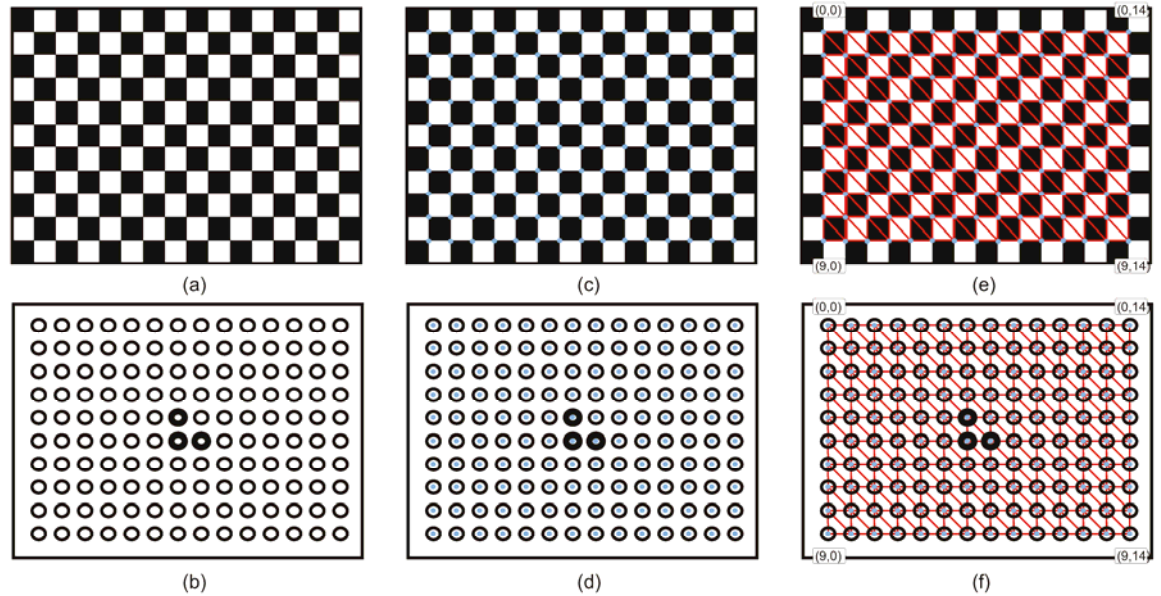


Figura 3.1 Distintas marcas que pueden ser utilizadas en el proceso de calibración, en (a) se utiliza un conjunto de cuadrados blancos y negros y en (b) se utilizan un conjunto de círculos. En (c) y en (d) se detectan las marcas utilizadas y finalmente en (e) y (f) se ordenan.

En la Figura 3.1 aparece un plano de calibración con un conjunto de cuadrados blancos y negros (a), (c) y (e) y un plano de calibración con un conjunto de círculos negros (b), (d) y (f). En el caso del plano con cuadrados negros y blancos las marcas a detectar son las esquinas de estos cuadrados. El algoritmo más utilizado para la detección de esquinas es el método de Harris [Harris 88][Deriche 93][Pollefeys 00]. Una implementación del algoritmo en MATLAB puede verse en [Kovesi 00]. En el algoritmo de Harris se calcula en todos los píxeles de la imagen una magnitud que determina lo mucho o poco que se parece un píxel a un punto esquina. Cuando esta medida supera un cierto umbral se considera que el

punto es una esquina. Una implementación del algoritmo de Harris en pseudocódigo se proporciona seguidamente

FOR cada píxel (u_c, v_c) **CALCULAR**,

$$G_x(u_c, v_c)$$

$$G_y(u_c, v_c)$$

FOR cada píxel (u_c, v_c) **CALCULAR**, para un cuadrado de tamaño N píxeles centrado en (u_c, v_c) ,

$$H(u_c, v_c) = \begin{pmatrix} A(u_c, v_c) & B(u_c, v_c) \\ B(u_c, v_c) & D(u_c, v_c) \end{pmatrix}$$

$$\text{con } A(u_c, v_c) = \sum_N (G_x * G_x)$$

$$\text{con } B(u_c, v_c) = \sum_N (G_x * G_y)$$

$$\text{con } C(u_c, v_c) = \sum_N (G_y * G_y)$$

$$R(u_c, v_c) = \text{Det}(H(u_c, v_c)) - k \text{Traza}(H(u_c, v_c))^2$$

BUSCAR máximos locales de R que corresponden a las esquinas en la imagen

En el algoritmo mostrado anteriormente, $G_x(u_c, v_c)$ es el gradiente de la imagen a lo largo del eje X calculado en el píxel (u_c, v_c) ; $G_y(u_c, v_c)$ es el gradiente de la imagen a lo largo del Y , **Det** es la operación determinante de una matriz y k es el factor de Harris, $k=0.04$.

El resultado de aplicar el detector de esquinas de Harris sobre el plano de calibración formado por cuadrados blancos y negros aparece en la Figura 3.2 (c) donde las esquinas calculadas mediante el algoritmo aparecen con puntos azules.

En la Figura 3.1 (b) aparece un plano de calibración con un conjunto de círculos de color negro sobre un fondo blanco. En este caso, las marcas son los distintos círculos y el objetivo es la localización de los centroides de cada uno de estos círculos. El algoritmo para la detección de estas marcas utilizado consiste en aplicar un método de binarización local sobre la imagen. Se divide la imagen original en pequeñas subimágenes que son umbralizadas. A cada píxel de cada subimagen se le asigna un 0 o un 1 dependiendo de que su intensidad sea mayor o

menor que un cierto umbral. Para cada subimagen se considera que el umbral de binarización es el valor medio de intensidad en dicha subimagen. Finalmente se obtiene el centroide de cada uno de los círculos identificados previamente mediante un proceso de extracción de píxeles conectados [Haralick 92].

En la Figura 3.1 (d) se observa el resultado de aplicar el proceso descrito anteriormente sobre la Figura 3.1 (b). En la Figura 3.1 (d) las posiciones calculadas de los centroides de los círculos negros aparecen identificadas mediante puntos azules.

En la Figura 3.2 se muestra el proceso de binarización de un plano de calibración con círculos. En la Figura 3.2 (a) aparece la imagen tomada por la cámara del plano de calibración y de la subimagen a binarizar, que aparece en la figura dentro de un recuadro rojo. En la Figura 3.2 (b) aparece la imagen resultante tras la binarización de la subimagen delimitada por el cuadrado rojo. En la Figura 3.3 se muestra el resultado del proceso de extracción de píxeles conectados sobre la imagen binarizada de todo el plano de calibración. En la Figura 3.3 (a) aparece la imagen de todo el plano de calibración binarizado. En la imagen Figure 3.3 (b) se observa el resultado al aplicar a la Figura 3.3 (a) el proceso de extracción de píxeles conectados. Cada círculo aparece etiquetado con un valor entero distinto del resto.

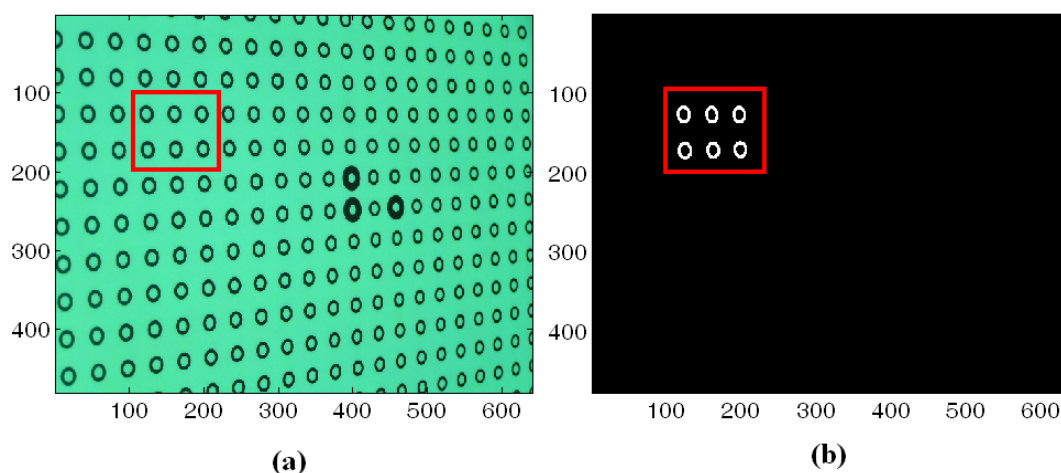


Figura 3.2 Ejemplo del proceso de binarización local utilizado para localizar los círculos del plano de calibración. En (a) aparece una imagen del plano y la subimagen que se va a binarizar. En (b) aparece el resultado de la binarización en la subimagen.

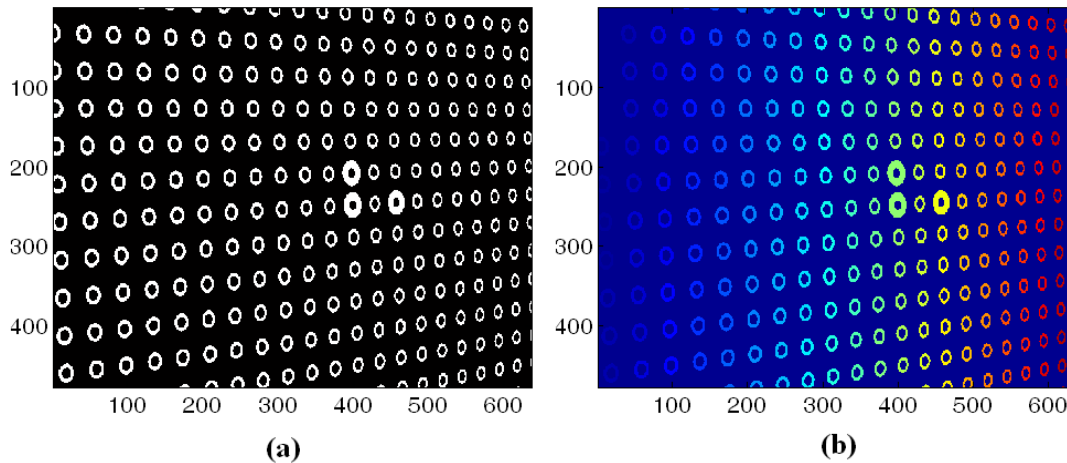


Figura 3.3 En (a) se muestra el resultado de aplicar el proceso de binarización a la Figura 3.3 (a). En (b) se muestra el resultado de aplicar el proceso de extracción de píxeles conectados en (a)

Una vez extraídas las marcas únicamente falta identificarlas para poder asignarlas sus coordenadas 3D respecto del sistema de referencia del mundo (*S.R.M*). Con este propósito es necesario identificar un conjunto de marcas características. En la Figura 3.1(a) es posible identificar las cuatro esquinas exteriores que aparecen mostradas en la Figura 3.4

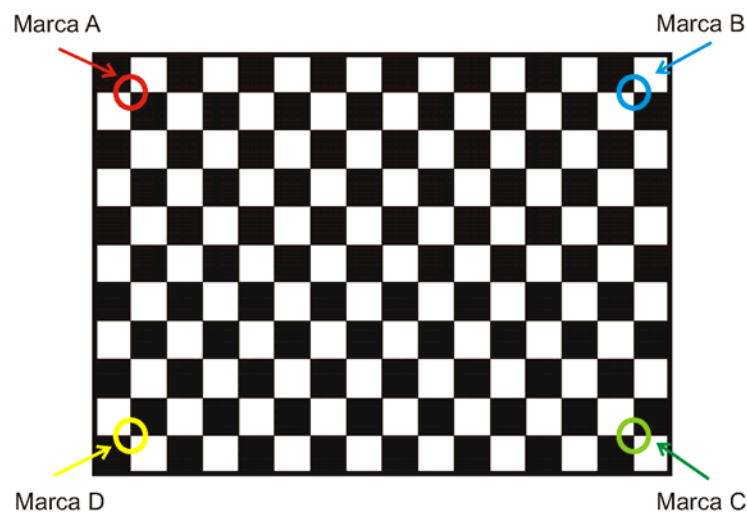


Figura 3.4 Cuatro esquinas más exteriores que se usan para referir el resto de marcas respecto al sistema de referencia del plano.

Para identificar las marcas más exteriores A , B , C y D en la Figura 3.4 se obtienen las cuatro marcas vecinas más próximas de cada marca mediante el método de Delaunay [Shu 03][Yu 06]. Mediante el algoritmo de Delaunay se obtienen un conjunto de triángulos con sus aristas situadas sobre las marcas y con la condición de que ninguna de las marcas se encuentre dentro de estos triángulos. La Figura 3.1 (c) muestra el conjunto de triángulos que se obtienen al aplicar el algoritmo de Delaunay. Usando este conjunto de triángulos se pueden obtener los cuatro vecinos más próximos de cada marca o esquina. Si calculamos para cada esquina la distancia entre sus cuatro vecinos más próximos obtendremos en el caso de las marcas A , B , C y D un valor muy pequeño y similar para dos de ellos y otros valores mucho más elevados y distintos de los anteriores para los otros dos. Para una esquina interior genérica —esquina que no sea ninguna de las marcas A , B , C o D mostradas en la Figura 3.4— la distancia a sus cuatro vecinos más próximos será muy similar entre todos ellos y pequeña. La Figura 3.5 muestra los cuatro vecinos, en color rojo, más próximos de una esquina exterior (en color verde) como es el caso de las marcas A , B , C y D en la Figura 3.5 y una esquina interior genérica, en color amarillo.

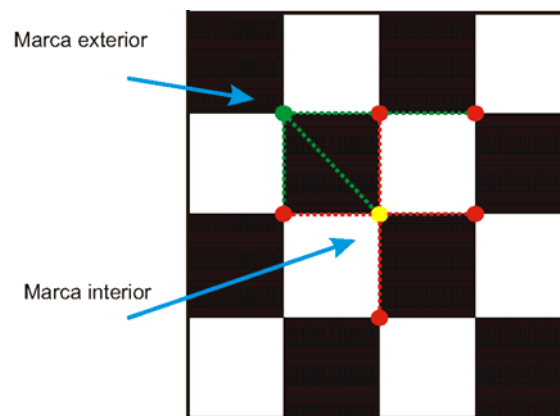


Figura 3.5 Cuatro vecinos más próximos (en color rojo) de una esquina exterior en color verde y de una esquina interior en color amarillo. Los vecinos más próximos de la marca exterior aparecen conectados con esta con una línea discontinua de color verde y los de la marca interior aparecen conectada con esta con una línea de color rojo.

Una vez están identificadas las marcas A , B , C y D la localización del resto de esquinas se hace usando el conjunto de triángulos de Delaunay que nos proporcionan los vecinos más próximos de cada esquina.

La identificación de los puntos característicos en la Figura 3.1 (b) es más sencilla debido a que aparecen tres círculos diferenciados del resto. Para identificar el resto de marcas se usan los triángulos de vecinos más próximos de Delaunay [Shu 03][Yu 06]. Una vez que están identificados y ordenados todos los puntos de control es posible referirlos respecto del sistema de referencia del plano o del mundo tomando una marca como origen.

3.2 Métodos estándar de calibración: directos y basados en modelo

En este apartado se va a explicar con detalle los dos métodos típicos para calibrar un sistema de triangulación activa, los métodos directos (o polinomiales) y basados en modelo (o fotogramétricos). En el Capítulo 2 (apartado 2.3) se introdujo de forma muy resumida estos métodos siendo imprescindible una explicación detallada en este capítulo para poder finalmente presentar y comparar con estas técnicas el método mixto de calibración propuesto.

Los métodos directos están basados en utilizar la relación monótonica y suave que existe entre la fase absoluta y la coordenada de profundidad. De esta forma conociendo un conjunto de pares fase absoluta-profundidad es posible mediante interpolación obtener la profundidad a partir de una fase absoluta. En los principales trabajos relativos a los métodos directos [Brenner 98][Gühring 00][Liu 03] se observa que la relación fase absoluta-profundidad se aproxima mediante polinomios de orden bajo. No obstante los autores no demuestran de forma analítica usando las expresiones típicas de la geometría proyectiva que esta afirmación es válida. En el apartado siguiente se demuestra analíticamente que la relación entre la fase absoluta y la profundidad viene dada por una expresión monótonica suave, dependiente de los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara y proyector. Obsérvese que esta deducción es un resultado novedoso de la memoria de tesis.

Los métodos de calibración fotogramétricos ajustan la cámara y el proyector respecto a un modelo. En el apartado 3.2.2 se explica con detalle los

principales métodos para la precisa modelación de una cámara y un proyector [Zhang 99][Zhang 00][Tsai 86][Tsai 87].

3.2.1 Métodos de calibración directos

Estos métodos usan una función arbitraria de calibración —generalmente polinomios de orden bajo— para describir el *mapping* entre la fase absoluta y las coordenadas tridimensionales del objeto a medir. Los parámetros de esta función se obtienen midiendo la fase absoluta sobre un conjunto de puntos cuyas coordenadas 3D son conocidas con mucha precisión. Para localizar un conjunto de puntos 3D en el espacio se utiliza un plano con marcas en posiciones conocidas y montado sobre un posicionador lineal.

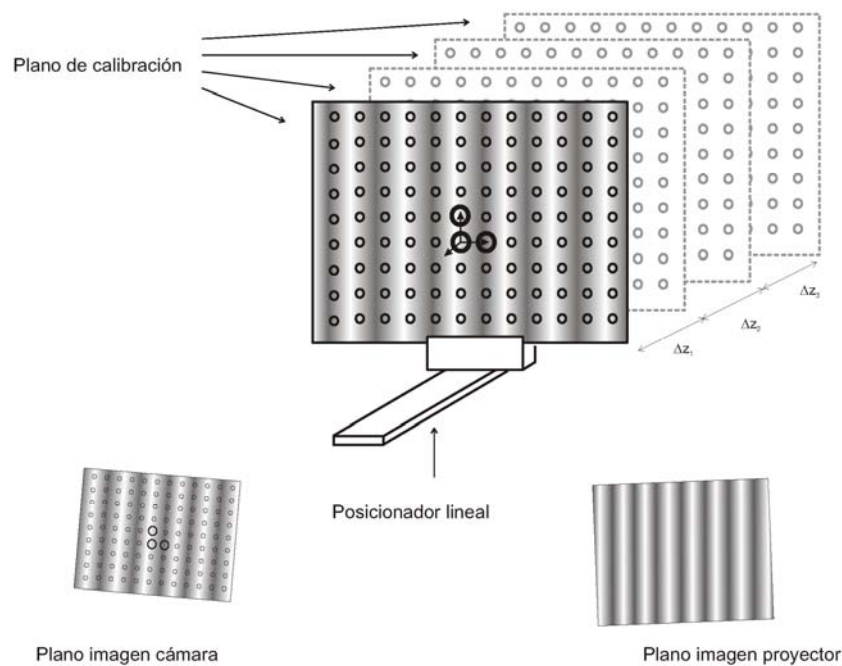


Figura 3.6 Montaje utilizado para calibrar un sistema de proyección de franjas mediante un método directo. En la Figura 3.6 aparece un plano de calibración con marcas montado sobre un posicionador lineal.

La Figura 3.6 muestra un esquema del montaje utilizado para calibrar mediante un método directo. En la Figura 3.6 una marca característica sobre el primer plano de calibración suele usarse como origen del sistema de referencia del mundo. El plano se desplaza unas cantidades conocidas con mucha precisión

$\Delta Z^1, \Delta Z^2, \Delta Z^3, \Delta Z^n$ paralelamente al primer plano. Teniendo en cuenta que el primer plano se toma como origen, tenemos que las posiciones en el eje Z respecto al sistema de referencia del mundo ($S.R.M$) para todos los puntos del plano son, $Z_w^1 = 0, Z_w^2 = \Delta Z^1, Z_w^3 = Z_w^2 + \Delta Z^2, Z_w^n = Z_w^{n-1} + \Delta Z^{n-1}$.

Para cada plano de calibración, se obtienen las posiciones de las marcas en el plano imagen de la cámara y la fase absoluta en cada píxel. Las coordenadas 3D de las marcas respecto al $S.R.M$ son conocidas. De esta forma para la i -ésima marca contenida en el plano de calibración situado en la posición α podemos formar el siguiente vector, $[m_{C,i}^\alpha, M_{W,i}^\alpha, \Phi^\alpha(m_{C,i}^\alpha)]$, donde $M_{W,i}^\alpha = [X_{W,i}^\alpha, Y_{W,i}^\alpha, Z_{W,i}^\alpha, 1]$. Obsérvese que $i \in [1, N]$ con N el número de marcas en el plano de calibración y que $\alpha \in [1, A]$, siendo 1 la posición del primer plano y A la última. El vector $[m_{C,i}^\alpha, M_{W,i}^\alpha, \Phi^\alpha(m_{C,i}^\alpha)]$ se extiende a todos los píxeles del plano retinal de la cámara mediante interpolación. De esta forma, obtenemos para cada píxel de la cámara (m_C) las coordenadas 3D del plano de calibración α -ésimo respecto del $S.R.M$ y la fase absoluta correspondiente; esto es $[m_C, M_W^\alpha(m_C), \Phi^\alpha(m_C)]$.

Para cada píxel en el plano retinal de la cámara (m_C), es posible representar los pares de valores $[Z_w^1(m_C), \Phi^1(m_C)], [Z_w^2(m_C), \Phi^2(m_C)], [Z_w^\alpha(m_C), \Phi^\alpha(m_C)], [Z_w^A(m_C), \Phi^A(m_C)]$, obteniéndose una figura similar a la mostrada en 2.13 (b). Obsérvese que $\alpha \in [1, A]$, siendo 1 la posición del primer plano y A la última. Esta curva puede ser aproximada a una función arbitraria de calibración, generalmente polinomios de orden bajo, $Z_w(m_C) = Z_\Phi[\Phi(m_C)]$.

La relación exacta entre la fase absoluta y las coordenada de profundidad respecto del $S.R.M$ (Z_w) se determina planteando las ecuaciones de proyección para las marcas sobre el plano en la cámara y en el proyector. Como ya se explicó en el Capítulo 2, la proyección de un punto 3D en el sistema de referencia de la cámara viene dada por,

$$sm_{C,i}^\alpha = s \begin{pmatrix} u_{C,i}^\alpha \\ v_{C,i}^\alpha \\ 1 \end{pmatrix} = K_C [R_C | \mathbf{t}_C] M_{W,i}^\alpha = \begin{pmatrix} f_C^x & 0 & c_C^x \\ 0 & f_C^y & c_C^y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} [R_C | \mathbf{t}_C] M_{W,i}^\alpha \quad (3.1)$$

donde, $M_{C,i}^\alpha = [X_{C,i}^\alpha, Y_{C,i}^\alpha, Z_{C,i}^\alpha, 1]^T$ son las coordenadas homogéneas 3D de la marca i -ésima sobre el plano de calibración en la posición α -ésima y referidas en el sistema de referencia del mundo. Por otra parte la matriz de roto-traslación que relaciona el sistema de referencia del mundo con el de la cámara viene dada por,

$$[R_C | \mathbf{t}_C] = \begin{pmatrix} r_{C,11} & r_{C,12} & r_{C,13} & t_{C,x} \\ r_{C,21} & r_{C,22} & r_{C,23} & t_{C,y} \\ r_{C,31} & r_{C,32} & r_{C,33} & t_{C,z} \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

donde, R_C es una matriz 3×3 de rotación y \mathbf{t}_C es un vector de traslación.

Expandiendo la expresión 3.1 y eliminando el factor de escala s , obtenemos,

$$\begin{aligned} u_{C,i}^\alpha &= f_C^x \frac{r_{C,11}X_{W,i}^\alpha + r_{C,12}Y_{W,i}^\alpha + r_{C,13}Z_{W,i}^\alpha + t_{C,x}}{r_{C,31}X_{W,i}^\alpha + r_{C,32}Y_{W,i}^\alpha + r_{C,33}Z_{W,i}^\alpha + t_{C,z}} + c_C^x \\ v_{C,i}^\alpha &= f_C^y \frac{r_{C,21}X_{W,i}^\alpha + r_{C,22}Y_{W,i}^\alpha + r_{C,23}Z_{W,i}^\alpha + t_{C,y}}{r_{C,31}X_{W,i}^\alpha + r_{C,32}Y_{W,i}^\alpha + r_{C,33}Z_{W,i}^\alpha + t_{C,z}} + c_C^y \end{aligned} \quad (3.3)$$

expandiendo las expresiones (3.3) obtenemos,

$$\begin{aligned} X_{W,i}^\alpha [(u_{C,i}^\alpha - c_C^x)r_{C,31} - f_C^x r_{C,11}] + Y_{W,i}^\alpha [(u_{C,i}^\alpha - c_C^x)r_{C,32} - f_C^x r_{C,12}] + \\ Z_{W,i}^\alpha [(u_{C,i}^\alpha - c_C^x)r_{C,33} - f_C^x r_{C,13}] = f_C^x t_{C,x} - (u_{C,i}^\alpha - c_C^x)t_{C,z} \end{aligned} \quad (3.4)$$

y,

$$\begin{aligned} X_{W,i}^\alpha [(v_{C,i}^\alpha - c_C^y)r_{C,31} - f_C^y r_{C,21}] + Y_{W,i}^\alpha [(v_{C,i}^\alpha - c_C^y)r_{C,32} - f_C^y r_{C,22}] + \\ Z_{W,i}^\alpha [(v_{C,i}^\alpha - c_C^y)r_{C,33} - f_C^y r_{C,23}] = f_C^y t_{C,y} - (v_{C,i}^\alpha - c_C^y)t_{C,z} \end{aligned} \quad (3.5)$$

despejando en ambas ecuaciones $Y_{w,i}^\alpha$ e igualando obtenemos,

$$Z_{w,i}^\alpha = \frac{a_c(u_{c,i}^\alpha, v_{c,i}^\alpha) X_{w,i}^\alpha + c_c(u_{c,i}^\alpha, v_{c,i}^\alpha)}{b_c(u_{c,i}^\alpha, v_{c,i}^\alpha)} \quad (3.6)$$

donde,

$$a_c(u_c, v_c) = \frac{[(v_c - c_c^y) r_{c,31} - f_c^y r_{c,21}][(u_c - c_c^x) r_{c,32} - f_c^x r_{c,12}] - [(v_c - c_c^y) r_{c,32} - f_c^y r_{c,22}][(u_c - c_c^x) r_{c,31} - f_c^x r_{c,11}]}{[(v_c - c_c^y) r_{c,32} - f_c^y r_{c,22}][(u_c - c_c^x) r_{c,31} - f_c^x r_{c,11}] - [(u_c - c_c^x) r_{c,32} - f_c^x r_{c,12}][(v_c - c_c^y) r_{c,31} - f_c^y r_{c,21}]} \quad (3.7)$$

$$c_c(u_c, v_c) = \frac{[(v_c - c_c^y) r_{c,32} - f_c^y r_{c,22}][f_c^x t_x - (u_c - c_c^x) t_{c,z}] - [(u_c - c_c^x) r_{c,32} - f_c^x r_{c,12}][f_c^y t_y - (v_c - c_c^y) t_{c,z}]}{[(u_c - c_c^x) r_{c,32} - f_c^x r_{c,12}][f_c^y t_y - (v_c - c_c^y) t_{c,z}] - [(v_c - c_c^y) r_{c,32} - f_c^y r_{c,22}][f_c^x t_x - (u_c - c_c^x) t_{c,z}]} \quad (3.8)$$

$$b_c(u_c, v_c) = \frac{[(u_c - c_c^y) r_{c,33} - f_c^y r_{c,13}][(v_c - c_c^y) r_{c,32} - f_c^x r_{c,22}] - [(v_c - c_c^y) r_{c,33} - f_c^y r_{c,23}][(u_c - c_c^x) r_{c,32} - f_c^x r_{c,12}]}{[(v_c - c_c^y) r_{c,33} - f_c^y r_{c,23}][(u_c - c_c^x) r_{c,32} - f_c^x r_{c,12}] - [(u_c - c_c^y) r_{c,33} - f_c^y r_{c,13}][(v_c - c_c^y) r_{c,32} - f_c^x r_{c,22}]} \quad (3.9)$$

De las expresiones (3.6), (3.7), (3.8) y (3.9) se observa que las líneas de vista que atraviesan el píxel (u_c, v_c) son rectas y por tanto tienen un grado de libertad. Para el proyector, las ecuaciones equivalentes a (3.3),

$$\begin{aligned} u_{p,i}^\alpha &= f_p^x \frac{r_{p,11} X_{w,i}^\alpha + r_{p,12} Y_{w,i}^\alpha + r_{p,13} Z_{w,i}^\alpha + t_{p,x}}{r_{p,31} X_{w,i}^\alpha + r_{p,32} Y_{w,i}^\alpha + r_{p,33} Z_{w,i}^\alpha + t_{p,z}} + c_p^x \\ v_{p,i}^\alpha &= f_p^y \frac{r_{p,21} X_{w,i}^\alpha + r_{p,22} Y_{w,i}^\alpha + r_{p,23} Z_{w,i}^\alpha + t_{p,y}}{r_{p,31} X_{w,i}^\alpha + r_{p,32} Y_{w,i}^\alpha + r_{p,33} Z_{w,i}^\alpha + t_{p,z}} + c_p^y \end{aligned} \quad (3.10)$$

donde en este caso la matriz de roto-translación $[R_p | t_p]$ relaciona el sistema de referencia del mundo con el sistema de referencia del proyector. Siguiendo pasos análogos al caso anterior podemos obtener para el proyector una expresión similar a (3.6). Como ya se expuso en el Capítulo 2 existe una relación lineal directa entre coordenadas en el plano retinal del proyector y fase absoluta proyectada. Suponiendo que proyectamos una fase absoluta paralela al eje X del plano retinal del proyector tenemos, $u_p = K\Phi_x$ donde $K = \frac{T_x}{2\pi}$ y T_x es la anchura en píxeles

de la franja proyectada en el PS. De esta forma la expresión (3.6) se reescribe para el caso del proyector y utilizando coordenadas de fase absoluta como,

$$Z_{W,i}^{\alpha} = \frac{[a_{1,P}(v_{P,i}^{\alpha}) + a_{2,P}(v_{P,i}^{\alpha})\Phi_x^{\alpha}(m_{C,i}^{\alpha})]X_{W,i}^{\alpha} + [c_{1,P}(v_{P,i}^{\alpha}) + c_{2,P}\Phi_x^{\alpha}(m_{C,i}^{\alpha})]}{[b_{1,P}(v_{P,i}^{\alpha}) + b_{2,P}(v_{P,i}^{\alpha})\Phi_x^{\alpha}(m_{C,i}^{\alpha})]} \quad (3.11)$$

donde,

$$a_{1P}(v_P) = \left[(v_P - c_P^y)r_{P,32} - f_P^y r_{P,22} \right] \left[c_P^x r_{P,31} + f_P^x r_{P,11} \right] - \left[(v_P - c_P^y)r_{P,31} - f_P^y r_{P,21} \right] \left[c_P^x r_{P,32} + f_P^x r_{P,12} \right]$$

$$a_{2P}(v_P) = (v_P - c_P^y)[r_{P,31} - r_{P,32}] - f_P^y[r_{P,21} - r_{P,22}]$$

$$c_{1P}(v_P) = \left[(v_P - c_P^y)r_{P,32} - f_P^y r_{C,22} \right] \left[f_P^x t_{P,x} + c_P^x t_{P,z} \right] - \left[-c_P^x r_{P,32} - f_P^x r_{P,12} \right] \left[f_P^y t_y - (v_P - c_P^y)t_{P,z} \right]$$

$$c_{2P} = f_P^y[r_{P,22}t_{P,z} - r_{P,32}t_{P,y}]$$

$$b_{1P}(v_P) = \left[f_P^x r_{P,22} - (v_P - c_P^y)r_{P,32} \right] \left[c_P^y r_{P,33} + f_P^y r_{P,13} \right] - \left[f_P^y r_{P,23} - (v_P - c_P^y)r_{P,33} \right] \left[c_P^x r_{P,32} + f_P^x r_{P,12} \right]$$

$$b_{2P}(v_P) = r_{P,33}[(v_P - c_P^y)r_{P,32} - f_P^x r_{P,22}] - r_{P,32}[(v_P - c_P^y)r_{P,33} - f_P^y r_{P,23}]$$

Despejando de (3.11) X_W y sustituyendo en (3.6) obtenemos

$$Z_{W,i}^{\alpha} = \frac{[c_C(m_{C,i}^{\alpha})a_{1,P}(v_{P,i}^{\alpha}) - a_C(m_{C,i}^{\alpha})c_{1,P}(v_{P,i}^{\alpha})] + [c_C(m_{C,i}^{\alpha})a_{2,P}(v_{P,i}^{\alpha}) - a_C(m_{C,i}^{\alpha})c_{2,P}(v_{P,i}^{\alpha})]\Phi_x^{\alpha}(m_{C,i}^{\alpha})}{[b_C(m_{C,i}^{\alpha})a_{1,P}(v_{P,i}^{\alpha}) - a_C(m_{C,i}^{\alpha})b_{1,P}(v_{P,i}^{\alpha})] + [b_C(m_{C,i}^{\alpha})a_{2,P}(v_{P,i}^{\alpha}) - b_{2,P}(v_{P,i}^{\alpha})a_C(m_{C,i}^{\alpha})]\Phi_x^{\alpha}(m_{C,i}^{\alpha})} \quad (3.12)$$

Obsérvese que en (3.12) $a_C(m_{C,i}^{\alpha})$, $b_C(m_{C,i}^{\alpha})$ y $c_C(m_{C,i}^{\alpha})$ son equivalentes a

$$a_C(u_{C,i}^{\alpha}, v_{C,i}^{\alpha}), b_C(u_{C,i}^{\alpha}, v_{C,i}^{\alpha}) \text{ y } c_C(u_{C,i}^{\alpha}, v_{C,i}^{\alpha})$$

La expresión (3.12) establece la dependencia de la profundidad respecto de la fase absoluta y parámetros intrínsecos extrínsecos del sistema 3D. Esta expresión es idéntica a la expresión obtenida en [Liu 03] mediante un método puramente geométrico sin utilizar las expresiones de la proyección.

Mediante la expresión (3.12) se realiza la calibración de la coordenada de profundidad Z_w . La calibración de las coordenadas laterales, X_w e Y_w se realiza a su vez mediante un conjunto de funciones de calibración del tipo $X_w(m_c) = X_\Phi[\Phi(m_c)]$, $Y_w(m_c) = Y_\Phi[\Phi(m_c)]$. La deducción analítica de estas funciones no se proporciona debido a que los pasos a seguir son idénticos a los ya realizados para obtener (3.12) no introduciéndose ningún resultado nuevo. Estas funciones de calibración se calculan de forma idéntica que en el caso de la profundidad, esto es interpolando los pares $[X_w^1(m_c), \Phi^1(m_c)]$, $[X_w^2(m_c), \Phi^2(m_c)]$, $[X_w^\alpha(m_c), \Phi^\alpha(m_c)]$, $[X_w^A(m_c), \Phi^A(m_c)]$ en el caso de la coordenada X_w y $[Y_w^1(m_c), \Phi^1(m_c)]$, $[Y_w^2(m_c), \Phi^2(m_c)]$, $[Y_w^\alpha(m_c), \Phi^\alpha(m_c)]$, $[Y_w^A(m_c), \Phi^A(m_c)]$, en el caso de la coordenada Y_w . Obsérvese que de nuevo $\alpha \in [1, A]$, siendo 1 la posición del primer plano y A la última

Una vez obtenidas las funciones de calibración $Z_w(m_c) = Z_\Phi[\Phi(m_c)]$, $X_w(m_c) = X_\Phi[\Phi(m_c)]$ e $Y_w(m_c) = Y_\Phi[\Phi(m_c)]$ en cada píxel de la cámara m_c , el proceso de calibración ha finalizado.

Para obtener una medida 3D de un objeto arbitrario, se proyecta sobre éste una fase absoluta (Φ). Las coordenadas 3D correspondientes a cada píxel m_c se obtienen mediante el uso de las funciones de calibración, que han sido obtenidas en el proceso de calibración previo. Con estas funciones se obtienen las coordenadas 3D correspondientes a cada píxel, $M_w(m_c)$ mediante $X_w(m_c) = X_\Phi[\Phi(m_c)]$, $Y_w(m_c) = Y_\Phi[\Phi(m_c)]$ y $Z_w(m_c) = Z_\Phi[\Phi(m_c)]$.

Los métodos directos de calibración tienen limitaciones prácticas. En primer lugar los distintos planos de calibración tienen que estar posicionados

paralelamente respecto del primero lo que complica la realización práctica de la calibración. Por otra parte las distancias de estos planos respecto del primer plano de calibración tienen que ser conocidas con mucha precisión. Esto hace que sea necesario usar posicionadores lineales precisos. Finalmente los métodos directos únicamente pueden ser usados para medir dentro del volumen que se ha calibrado. Esto es debido a que estos métodos están basados en la realización de interpolaciones para obtener la calibración, por lo que no se puede asegurar la validez de la calibración fuera de dicho volumen.

La principal ventaja de estos métodos es fundamentalmente su gran precisión. Esto es debido a que se realiza una calibración para cada píxel independientemente del resto y no se modela ningún elemento óptico. De esta forma, problemas típicos como el de modelar las aberraciones de los sistemas ópticos se resuelven inmediatamente. Por otra parte estos métodos de calibración no requieren realizar ninguna optimización no-lineal que siempre es un proceso costoso desde el punto de vista del tiempo de cálculo y puede dar lugar a resultados erróneos si se converge a un mínimo local.

3.2.2 Métodos de calibración basados en modelo

En los métodos basados en modelo, es necesario determinar los parámetros de un modelo geométrico que describa el proceso de formación de imagen de los sensores. Debido a que un proyector puede considerarse como una cámara inversa, los mismos modelos para simular una cámara son aplicables a un proyector de luz.

El modelo de cámara más utilizado es el modelo *pin-hole*. Este modelo simula la cámara mediante un centro de proyección (punto al que van a parar todos los rayos) y un plano imagen. Para obtener resultados precisos este modelo tiene que ser ampliado introduciendo la distorsión de la lente objetivo. Una descripción más detallada del modelo *pin-hole* se muestra en la sección 2.2 del Capítulo 2.

Para la calibración de un sistema de triangulación activa mediante una calibración basada en modelo, es necesaria la calibración de la cámara, del proyector y finalmente del sistema 3D.

En la calibración de la cámara se usan fundamentalmente dos métodos de calibración, el llamado método de Zhang [Zhang 99][Zhang 00] y el método de Tsai [Tsai 86][Tsai 87]. El método usado en el presente proyecto de tesis ha sido el método de Zhang debido a que no es necesario utilizar objetos tridimensionales de calibración. En el método de Zhang la calibración se realiza con un plano de calibración observándolo en diferentes posiciones. Por otra parte, el método de Zhang no requiere conocer a priori el valor de parámetros de la cámara como la distancia entre sus píxeles, así como el factor de escala que tiene en cuenta la incertidumbre introducida por ligeros desfases entre el hardware de adquisición de imagen y el hardware de lectura de la cámara [Tsai 86][Tsai 87].

El método de Zhang se basa en observar un plano de calibración en una serie de posiciones desconocidas. Para cada posición del plano se obtienen las coordenadas de las marcas en el plano imagen de la cámara y en el sistema de referencia del plano, de los puntos de control mediante los métodos expuestos en la sección 3.1.1. Zhang [Zhang 99] [Zhang 00] establece que son necesarias un mínimo de dos posiciones distintas del plano de calibración para la calibración. Para el conjunto de orientaciones del plano, este método de calibración permite obtener los parámetros internos de la cámara y las matrices de roto-translación que relacionan los sistemas de referencia de cada plano con el sistema de referencia de la cámara. Estas matrices de roto-traslación permiten obtener las coordenadas espaciales de los puntos de control respecto del sistema de referencia de la cámara. Para una posición del plano de calibración denotada con el superíndice α , la relación entre las coordenadas 3D de la i -ésima marca con coordenadas homogéneas $M_i^\alpha = [X_i^\alpha, Y_i^\alpha, 0, 1]^\top$, y su proyección en el plano imagen de la cámara $m_{C,i}^\alpha = [u_{C,i}^\alpha, v_{C,i}^\alpha, 1]^\top$ viene dada por una homografía H^α . Obsérvese que en este caso no existe un único sistema de referencia y cada plano de calibración tiene su propio sistema de referencia centrado en una marca

característica y paralelo a la dirección del plano (véase la Figura 2.14). Por esta razón $Z_i^\alpha = 0$ y desaparece el subíndice W de la notación.

Estas Homografías están compuestas por los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara,

$$s \begin{pmatrix} u_{C,i}^\alpha \\ v_{C,i}^\alpha \\ 1 \end{pmatrix} = H_C^\alpha \begin{pmatrix} X_i^\alpha \\ Y_i^\alpha \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (3.13)$$

con

$$H_C^\alpha = K_C [R_C^\alpha | \mathbf{t}_C^\alpha], \quad (3.14)$$

y

$$K_C = \begin{pmatrix} f_C^x & 0 & c_C^x \\ 0 & f_C^y & c_C^y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.15)$$

donde s es el factor de escala, K_C es la matriz de parámetros intrínsecos de la cámara, f_C^x y f_C^y son las distancias focales y c_C^x , c_C^y las coordenadas del punto principal. Los parámetros extrínsecos, $[R_C^\alpha | \mathbf{t}_C^\alpha]$ relacionan los sistemas de referencia de los distintos planos de calibración con el sistema de referencia de la cámara.

Estas homografías se obtienen usando las posiciones conocidas de las marcas $[X_i^\alpha, Y_i^\alpha, 0, 1]^T$ y sus proyecciones en el plano imagen de la cámara $[u_{C,i}^\alpha, v_{C,i}^\alpha, 1]^T$ que se miden. El método para computar estas homografías se llama DLT (*Direct Linear Transformation*) [HZ 00] que consiste en plantear un sistema lineal sobredeterminado del que se obtiene la homografía. De la ecuación de proyección (3.13) eliminando el factor de escala s obtenemos

$$(H_C^{3,\alpha} M_i^\alpha) u_{C,i}^\alpha = H_C^{1,\alpha} M_i^\alpha \quad (H_C^{3,\alpha} M_i^\alpha) v_{C,i}^\alpha = H_C^{2,\alpha} M_i^\alpha \quad (3.16)$$

donde $H_C^{1,\alpha}$, $H_C^{2,\alpha}$, $H_C^{3,\alpha}$ denotan la primera, segunda y tercera fila respectivamente de la homografía que relaciona las coordenadas 3D de las marcas del plano α con su imagen en plano imagen de la cámara. De la ecuación (3.16) obtenemos,

$$\begin{aligned} H_C^{1,\alpha} M_i^\alpha - (H_C^{3,\alpha} M_i^\alpha) u_{C,i}^\alpha &= 0 \\ H_C^{2,\alpha} M_i^\alpha - (H_C^{3,\alpha} M_i^\alpha) v_{C,i}^\alpha &= 0 \end{aligned} \quad (3.17)$$

agrupando,

$$\begin{pmatrix} M_i^\alpha & 0 & -M_i^\alpha u_{C,i}^\alpha \\ 0 & M_i^\alpha & -M_i^\alpha v_{C,i}^\alpha \end{pmatrix} h^\alpha = 0 \quad (3.18)$$

donde $h^\alpha = [h_{11}^\alpha, h_{12}^\alpha, h_{13}^\alpha, h_{21}^\alpha, h_{22}^\alpha, h_{23}^\alpha, h_{31}^\alpha, h_{32}^\alpha, h_{33}^\alpha]$. De (3.18) se observa que para cada marca tenemos una igualdad. Se pueden agrupar las expresiones correspondientes a (3.18) para todas las marcas en una única expresión,

$$\begin{pmatrix} M_1^\alpha & 0 & -M_1^\alpha u_{C,1}^\alpha \\ 0 & M_1^\alpha & -M_1^\alpha v_{C,1}^\alpha \\ \dots & \dots & \dots \\ M_n^\alpha & 0 & -M_n^\alpha u_{C,n}^\alpha \\ 0 & M_n^\alpha & -M_n^\alpha v_{C,n}^\alpha \\ \dots & \dots & \dots \\ M_N^\alpha & 0 & -M_N^\alpha u_{C,N}^\alpha \\ 0 & M_N^\alpha & -M_N^\alpha v_{C,N}^\alpha \end{pmatrix} h^\alpha = 0 \quad (3.19)$$

La ecuación (3.19) es un sistema sobredimensionado que puede ser resuelto mediante SVD (*Singular Value Decomposition*) [HZ 00].

En el método de Zhang, tras obtener las homografías se calcula una primera estimación de los parámetros internos y externos de la cámara introduciendo restricciones geométricas. Una vez finalizada esta primera estimación de los parámetros, estos son optimizados minimizando error de retroproyección introducido en el apartado 2.3.2. El funcional a minimizar viene dado por tanto por,

$$\sum_{\alpha} \sum_i \|m_{c,i}^{\alpha} - H_c^{\alpha}(K_c, R_c^{\alpha}, \mathbf{t}_c^{\alpha}) \cdot M_i^{\alpha}\| \quad (3.20)$$

La expresión (3.20) se minimiza usando el algoritmo de Levenberg-Marquardt [More 77]. Una vez se ha obtenido una primera estimación de $K_c, R_c^{\alpha}, \mathbf{t}_c^{\alpha}$ se calculan los dos parámetros de la distorsión radial k_1, k_2 introducida por la lente mediante mínimos cuadrados. Finalmente se realiza una optimización de todos los parámetros mediante el algoritmo de Levenberg-Marquardt [More 77].

En el caso del proyector, éste puede considerarse como una cámara inversa y por tanto puede ajustarse al mismo modelo de cámara *pin-hole* con distorsión. Para la calibración del proyector se usan los mismos algoritmos que en el caso de la cámara [Legarda 04]. El proceso de calibración es ligeramente más tedioso debido a que el proyector no “ve” el plano de calibración y por tanto es necesario el uso de una cámara que no tiene que estar calibrada previamente.

La principal ventaja de este método es que debido a que tanto la cámara como el proyector son modelados, en el proceso de medida no se está limitado a trabajar dentro de un volumen de trabajo como en el caso de los métodos directos. Por otra parte, los principales inconvenientes de estos métodos son que es necesario realizar optimizaciones no-lineales en el proceso de calibración con las que siempre existe el riesgo de converger en un mínimo local y no en el global si se usa una mala semilla.

El principal objetivo de este capítulo es introducir un método de calibración para un sistema de triangulación activa en el que se solucionen los principales problemas prácticos que presentan las principales técnicas existentes de calibración expuestas anteriormente.

3.3 Método propuesto de calibración mixta

En este apartado se va a introducir el método de calibración mixta propuesto. Inicialmente (apartado 3.3.1) se explica el procedimiento de calibración, seguidamente se proporciona el procedimiento necesario para realizar una medida

3D de un objeto arbitrario con el sistema previamente calibrado (apartado 3.3.2) y finalmente se dan los resultados experimentales que validan la técnica propuesta.

3.3.1 Procedimiento de Calibración

El primer paso del procedimiento de calibración consiste en observar un plano con marcas situado en un conjunto de posiciones desconocidas. Para cada uno de estos planos de calibración, se mide la fase absoluta, Φ^α (mediante el método GC+PS, véase apartado 2.1) y la localización de las marcas en el plano imagen de la CCD, $m_{C,i}^\alpha$. Las coordenadas 3D de estas marcas respecto a un sistema de referencia ligado al plano de calibración (sistema de referencia centrado en una marca característica y con su eje Z paralelo a la dirección del plano, véase la Figura 2.14) $M_i^\alpha = [X_i^\alpha, Y_i^\alpha, 0, 1]^T$ son conocidas.

Una vez que los puntos de control han sido extraídos para un conjunto de planos de calibración, el siguiente paso consiste en calibrar la cámara mediante el método de Zhang [Zhang 99][HZ 00]. En un procedimiento de calibración basado en modelo, el siguiente paso correspondería a la calibración del proyector. En el método mixto no es necesario calibrar explícitamente el proyector, obteniendo sus parámetros intrínsecos y extrínsecos, como se va a mostrar.

Una vez se ha medido los parámetros extrínsecos de la cámara y la fase absoluta para todos los planos de calibración, se obtienen las coordenadas 3D de las marcas sobre los planos de calibración respecto al sistema de referencia de la cámara, como $M_{C,i}^\alpha = [X_{C,i}^\alpha, Y_{C,i}^\alpha, Z_{C,i}^\alpha, 1]^T$, como

$$\begin{pmatrix} X_{C,i}^\alpha \\ Y_{C,i}^\alpha \\ Z_{C,i}^\alpha \\ 1 \end{pmatrix} = [R_C^\alpha | \mathbf{t}_C^\alpha] \begin{pmatrix} X_i^\alpha \\ Y_i^\alpha \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (3.21)$$

Mientras que la fase absoluta para cada plano de calibración Φ^α ha sido obtenida para cada píxel de la cámara, las coordenadas 3D de cada plano de calibración

únicamente han sido obtenidas para los píxeles $m_{C,i}^\alpha = [u_{C,i}^\alpha, v_{C,i}^\alpha, 1]^T$. Por tanto para obtener las correspondencias para todos los píxeles de la cámara es necesaria la interpolación de los datos presentados en (3.17) a todos los píxeles. El resultado de este procedimiento es un conjunto de coordenadas $[X_C^\alpha, Y_C^\alpha, Z_C^\alpha, \Phi^\alpha]$ para todos los píxeles de la cámara y posiciones del plano de calibración. Como se ha demostrado en la expresión (3.12) la relación entre la coordenada de profundidad y la fase absoluta puede ser descrita de forma adecuada mediante un polinomio de orden bajo [Liu 03]. Por lo tanto para finalizar el procedimiento de calibración, es necesario computar un ajuste polinomial para las coordenadas de profundidad y valores de fase en cada píxel $[Z_C^\alpha, \Phi^\alpha]$.

Los resultados del procedimiento de calibración son por tanto los parámetros intrínsecos de la cámara (K_C y parámetros de distorsión) y las funciones de calibración $Z_C = Z_\Phi[\Phi(m_C)]$ en cada píxel.

3.3.2 Procedimiento de Medida

Para obtener una medida 3D de un objeto arbitrario inicialmente, con el sistema de triangulación activa previamente calibrado mediante el procedimiento descrito en el apartado 3.3.1, se obtiene la fase absoluta para cada píxel de la cámara m_C , $\Phi(m_C)$, mediante la técnica GC+PS. Seguidamente la coordenada de profundidad respecto del sistema de referencia de la cámara correspondiente a cada uno de los píxeles del plano retinal de la cámara se calcula a partir de la relación polinómica ($Z_C = Z(\Phi(m_C))$) que fue determinada en el procedimiento de calibración. Si se denota como P_{m_C} la relación polinómica para cada píxel m_C , la coordenada de profundidad respecto del sistema de referencia de la cámara Z_C , se obtiene como,

$$Z_C = P_{m_C}(\Phi(m_C)) \quad (3.22)$$

Una vez que la coordenada de profundidad se ha obtenido para todos los píxeles de la cámara mediante (3.22), se computan las coordenadas laterales. Las

coordenadas laterales (X_C, Y_C) se obtienen mediante los parámetros internos y de distorsión de la cámara y las coordenadas de profundidad Z_C . Inicialmente mediante (3.13) y (3.14) se obtienen las coordenadas normalizadas afectadas por la distorsión para cada píxel denotadas por $[x_{C,d}, y_{C,d}, 1]^T$ como,

$$s \begin{pmatrix} x_{C,d} \\ y_{C,d} \\ 1 \end{pmatrix} = K_C^{-1} \begin{pmatrix} u_C \\ v_C \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

donde,

$$x_{C,d} = \frac{X_C}{Z_C} + \Delta x_C \quad (3.24)$$

y

$$y_{C,d} = \frac{Y_C}{Z_C} + \Delta y_C \quad (3.25)$$

En las ecuaciones (3.24) y (3.25) Δx_C y Δy_C simbolizan el desplazamiento introducido por la distorsión de la lente en m_C .

Para obtener las coordenadas normalizadas libres de distorsión es necesario usar los parámetros de distorsión obtenidos previamente en el proceso de calibración de la cámara [Zhang 99][HZ 00]. Eliminando la distorsión, mediante las expresiones (3.24) y (3.25) se obtienen las coordenadas laterales respecto del sistema de referencia de la cámara,

$$X_C = Z_C (x_{C,d} - \Delta x_C) \quad (3.26)$$

y

$$Y_C = Z_C (y_{C,d} - \Delta y_C) \quad (3.27)$$

Como se ha mostrado, la técnica de calibración propuesta permite la medida de las coordenadas 3D de un objeto mediante el uso de un conjunto de planos de calibración en posiciones desconocidas por lo que no es necesario el uso de posicionadores lineales. Por otra parte, el proyector no se calibra explícitamente obteniéndose sus parámetros intrínsecos y extrínsecos a diferencia de los métodos de calibración fotogramétricos.

3.3.3 Resultados experimentales

El procedimiento de calibración ha sido probado mediante el uso de un sistema de triangulación activa estándar formado por un proyector y una cámara comerciales. El proyector usado ha sido un Mitsubishi LVP-200E mientras que la cámara fue una Olympus C-750 UZ controlada mediante el *Software Development Kit* (SDK) proporcionado por el fabricante. Esta cámara permite modificar su distancia focal, zoom y tiempo de exposición programáticamente.

Para probar la validez del método presentado, se ha comparado el método de calibración propuesto con el método de calibración directo, que es el método más preciso [Brenner 98][Liu 03].

El procedimiento de calibración propuesto se ha llevado a cabo usando nueve planos de calibración en posiciones desconocidas. Una vez que la calibración ha terminado, se obtiene para cada plano de calibración la diferencia entre las coordenadas 3D medidas y conocidas de cada plano. Se calculan tanto el máximo valor del error (*e.m.*) como el error cuadrático medio (*r.m.s*) de dicha diferencia.

El procedimiento de calibración mediante ajuste a polinomios se ha llevado a cabo usando cinco planos en posiciones conocidas. Después de que el proceso de calibración ha finalizado se obtienen los errores *e.m.* y *r.m.s* comparando las coordenadas 3D medidas y conocidas de cada plano de calibración. Las Tablas 3.1 y 3.2 recogen los resultados de los errores obtenidos para el método de calibración propuesto y para el método de calibración directo. Con la finalidad de comparar los dos métodos estos errores se han calculado en cinco planos de calibración comunes en ambos métodos.

		X_C	Y_C	Z_C	$f.o.v$
Plano 1	$e.m$	0.3	0.3	0.065	157
	$r.m.s$	0.04	0.04	0.04	
Plano 2	$m.e$	0.3	0.3	0.2	160
	$r.m.s$	0.04	0.04	0.01	
Plano 3	$m.e$	0.3	0.3	0.4	164
	$r.m.s$	0.04	0.04	0.02	
Plano 4	$m.e$	0.3	0.3	0.3	167
	$r.m.s$	0.04	0.04	0.02	
Plano 5	$m.e$	0.2	0.2	0.08	170
	$r.m.s$	0.04	0.04	0.005	

Tabla 3.1 Errores de retroproyección en milímetros obtenidos usando el método de calibración mixto propuesto. En la Tabla 3.1 $f.o.v$ (field of view) denota campo de visión. Obsérvese que las coordenadas espaciales obtenidas mediante el método propuesto están referidas en el sistema de referencia de la cámara y por tanto denotadas por X_C , Y_C , Z_C

		X_w	Y_w	Z_w	$f.o.v$
Plane 1	$m.e$	0.01	0.007	0.02	157
	$r.m.s$	0.004	0.001	0.01	
Plane 2	$m.e$	0.04	0.02	0.08	160
	$r.m.s$	0.01	0.005	0.04	
Plane 3	$m.e$	0.06	0.05	0.1	164
	$r.m.s$	0.02	0.009	0.07	
Plane 4	$m.e$	0.04	0.03	0.1	167
	$r.m.s$	0.02	0.006	0.05	
Plane 5	$m.e$	0.01	0.01	0.03	170
	$r.m.s$	0.004	0.001	0.01	

Tabla 3.2 Errores de retroproyección en milímetros obtenidos usando el método de calibración polinomial. En la tabla $f.o.v$ (field of view) denota campo de visión. Obsérvese que las coordenadas espaciales obtenidas mediante el método propuesto están referidas en el sistema de referencia de la cámara y por tanto denotadas por X_w , Y_w , Z_w

Como se observa de las Tablas 3.1 y 3.2 la coordenada Z es similar en ambos casos. Por otra parte el $r.m.s$ de las coordenadas laterales es superior en la técnica propuesta que en el método de calibración directo. Esto ocurre porque los parámetros internos y distorsión de la cámara son necesarios para obtener las coordenadas laterales y por tanto se propagan los errores computados de estos parámetros.

La siguiente prueba que se ha llevado a cabo para testear el método de calibración propuesto ha sido obtener una medida 3D de un objeto usando los dos esquemas de calibración en un mismo sistema de medida. De esta forma el sistema de triangulación se calibra mediante el método directo y el método propuesto, seguidamente se obtiene un mapa de fase del objeto a medir. Obviamente el mismo mapa de fase se puede usar para obtener una medida 3D del objeto mediante ambos métodos de calibración. La Figura 3.6 muestra una imagen del objeto que va ser digitalizado.

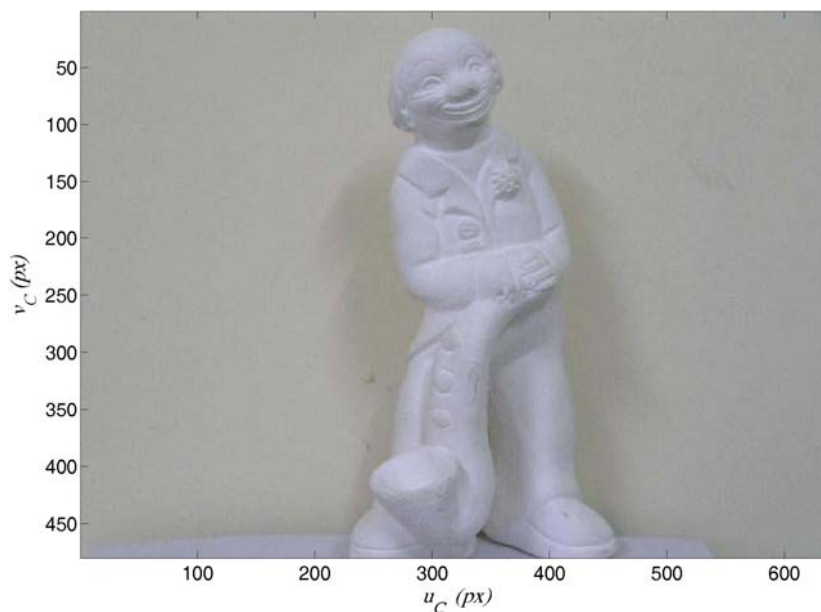


Figura 3.6 Imagen del objeto a digitalizar usando nuestro método de calibración propuesto y mediante el método directo de calibración.

La comparación de los resultados obtenidos no es directa debido a que el sistema de referencia usado en el método propuesto (sistema de referencia de la cámara) no coincide con el usado en el método directo (sistema de referencia del mundo). Para comparar los resultados obtenidos se han elegido una serie de puntos arbitrarios en la fase absoluta medida (puntos que llamaremos puntos de control). Es posible comparar los resultados obtenidos entre los dos métodos midiendo la distancia euclídea entre cada uno de los puntos de control. Obviamente la distancia euclídea es un invariante ante cambios de referencia. Los puntos de control se han elegido distribuidos aproximadamente de forma uniforme sobre el

objeto de medida. La Figura 3.7 muestra una imagen de la fase absoluta que ha sido triangulada con los puntos de control usados y etiquetados como p_1 , p_2 , p_3 , p_4 , p_5 , p_6 , p_7 .

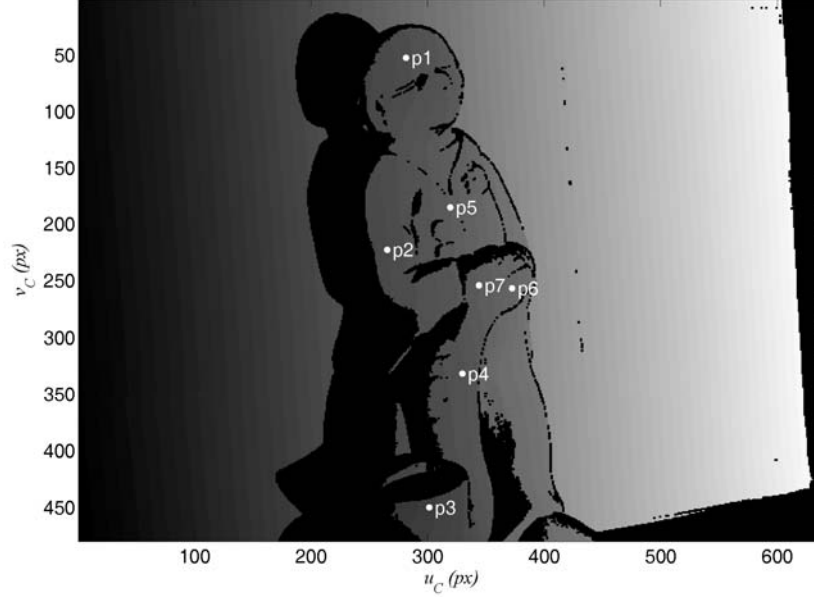


Figura 3.7 Imagen de la fase absoluta obtenida mediante el método GC+PS del objeto a digitalizar con los puntos de control denotados mediante p_1 , p_2 , p_3 , p_4 , p_5 , p_6 , p_7

La Tabla 3.3 muestra las coordenadas 3D de los puntos de control al usar ambos métodos de calibración.

La distancia euclídea entre los puntos de control p_i y p_j viene dada por, $d_{ij} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2}$ y la expresión del error de d_{ij} se obtiene a partir de la propagación de los errores de X , Y y Z como, $\Delta d_{ij} = 2 \frac{|X_i - X_j| \Delta X + |Y_i - Y_j| \Delta Y + |Z_i - Z_j| \Delta Z}{\sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2}}$ donde ΔX , ΔY y ΔZ son los

errores en la medida de las coordenadas espaciales. Para cada método de calibración se ha estimado ΔX , ΔY y ΔZ como el promedio de los *r.m.s* obtenidos en las Tablas 3.1 y 3.2. Estas estimaciones se dan en la Tabla 3.4

	A			B		
	X_C	Y_C	Z_C	X_W	Y_W	Z_W
p_1	-36.50	-69.14	672.94	-12.35	-77.58	31.06
p_2	-43.27	-4.84	683.20	-16.71	-13.69	42.78
p_3	-27.43	77.39	640.54	-30.53	69.84	3.95
p_4	-17.53	36.20	668.64	-4.86	29.03	19.10
p_5	-22.04	-19.23	690.45	6.17	-26.85	36.97
p_6	-1.53	8.22	685.00	19.11	2.00	22.74
p_7	-12.35	7.37	677.87	6.17	0.37	22.99

Tabla 3.3 Coordenadas espaciales de las marcas seleccionadas y mostradas en la Figura 3.4, obtenidas usando el método de calibración propuesto (A) y el método directo (B). Todas las medidas se dan en milímetros

	A	B
ΔX	0.04	0.011
ΔY	0.04	0.0044
ΔZ	0.02	0.036

Tabla 3.4 Errores calculados para las coordenadas espaciales mediante el método de calibración propuesto (columna A) y mediante el método directo (columna B). Todos los datos son dados en milímetros.

La Tabla 3.5 muestra la diferencia absoluta $|d^Z - d^P|$, entre las distancias euclídeas medidas usando el método de calibración propuesto (d^Z) y mediante el método directo (d^P). La Tabla 3.5 también muestra los errores esperados para las distancias euclídeas.

	A	B	$ d^Z - d^P $	Δd^Z	Δd^P	$\Delta d^Z + \Delta d^P$
d_{1-2}	65.46	65.10	0.36	0.093	0.023	0.12
d_{1-3}	150.34	150.9	0.56	0.091	0.024	0.12
d_{1-4}	107.12	107.54	0.42	0.094	0.018	0.11
d_{1-5}	54.82	54.33	0.49	0.11	0.024	0.13
d_{1-6}	85.74	85.98	0.24	0.11	0.024	0.13
d_{1-7}	80.37	80.53	0.16	0.10	0.021	0.12
d_{2-3}	93.97	93.15	0.82	0.10	0.041	0.14
d_{2-4}	50.58	50.26	0.32	0.12	0.047	0.16
d_{2-5}	26.65	27.03	0.38	0.12	0.039	0.16
d_{2-6}	43.77	43.94	0.16	0.10	0.055	0.16
d_{2-7}	33.67	33.36	0.31	0.10	0.062	0.17
d_{3-4}	50.84	50.54	0.30	0.10	0.040	0.14
d_{3-5}	108.89	108.57	0.32	0.093	0.038	0.13

d_{3-6}	86.21	86.14	0.07	0.11	0.036	0.14
d_{3-7}	80.77	80.84	0.07	0.10	0.035	0.14
d_{4-5}	59.74	59.70	0.04	0.095	0.034	0.13
d_{4-6}	36.14	36.31	0.17	0.11	0.029	0.14
d_{4-7}	30.71	30.95	0.24	0.10	0.025	0.13
d_{5-6}	34.70	34.67	0.03	0.12	0.045	0.16
d_{5-7}	30.98	30.61	0.38	0.11	0.041	0.15
d_{6-7}	12.99	13.05	0.06	0.094	0.025	0.12

Tabla 3.5 Distancia euclídea entre una serie de puntos seleccionados mostrados en la Figura 3.7 usando el método de calibración propuesto (columna A) y el método directo (columna B), la diferencia entre estas distancias euclídeas así como los errores asociados también se muestran. Todas las medidas son dadas en milímetros

Como puede observarse en la Tabla 3.5 la diferencia absoluta ($|d^Z - d^P|$) y la suma de los errores de las distancias euclídeas estimadas ($\Delta d^Z + \Delta d^P$), tienen valores comparables en todos los casos, por lo tanto los resultados mostrados en la Tabla 3.4 son consistentes con los errores de retroproyección mostrados en las Tablas 3.1 y 3.2.

Finalmente, las Figura 3.8 y 3.9 muestran la medida 3D del objeto mostrado en la Figura 3.6. La Figura 3.8 muestra un renderizado de todo el objeto mientras que la Figura 3.9 es una malla de las coordenadas 3D de la cabeza del objeto. Tanto la Figura 3.8 como la Figura 3.9 están obtenidas usando la técnica de calibración propuesta. Obsérvese que las dimensiones laterales del objeto son de unos 20 cm en los ejes X e Y, y la cabeza es de unos 30 mm en idénticos ejes. La Figura 3.8 muestra una medida densa y con alto grado de detalle. Es

importante recalcar que los datos mostrados en las Figuras 3.8 y 3.9 son dados sin ningún post-procesado del tipo suavizado o filtrado.

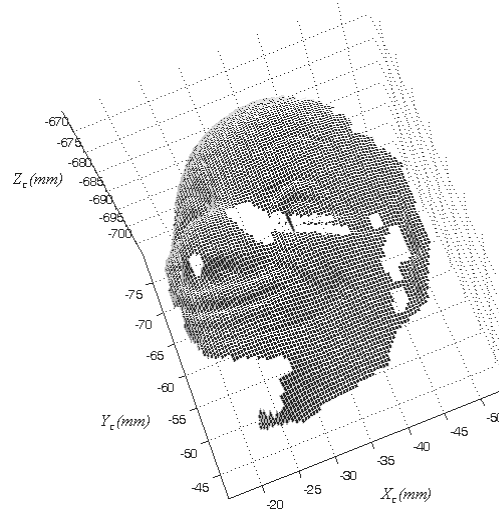


Figura 3.8 Medida 3D de la cabeza del objeto mostrado en Figura 3.6 obtenida mediante el método de calibración propuesto

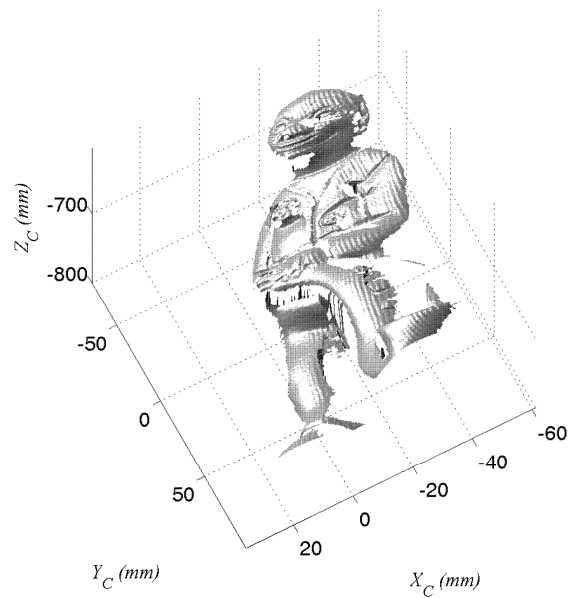


Figura 3.8 Medida 3D del objeto mostrado en Figura 3.6 obtenida mediante el método de calibración propuesto

3.4 Conclusiones

Se ha presentado un método de calibración para un sistema de triangulación activa estándar que es más flexible y manejable que el método de calibración directo debido a que por una parte no es necesario usar posicionadores lineales precisos y por otra puede ser usado fuera del volumen calibrado. El método propuesto no necesita modelar el proyector como una cámara inversa o realizar explícitamente la calibración del sistema de triangulación mediante la determinación de la matriz de roto-traslación. La técnica propuesta de calibración puede ser usada cuando se está interesado en medir objetos extensos. En este caso la calibración mediante un método directo es muy difícil de realizar desde un punto práctico debido a la necesidad de usar posicionadores lineales. Se ha demostrado la validez del método propuesto comparándolo con el método estándar basado en ajuste polinomial. Como conclusión, los resultados han mostrado que ambos métodos de calibración poseen precisiones similares, siendo el método propuesto más manejable y rápido.

El trabajo presentado en este capítulo ha dado lugar a la publicación referenciada [Vargas 07]

Capítulo 4

Método local de multiresolución

“No pretendas apagar con fuego un incendio, ni remediar con agua una inundación”

Confucio

“Si buscas resultados distintos no hagas siempre lo mismo”

Aristóteles

Los sistemas de medida 3D basados en triangulación con una geometría fija tienen limitaciones prácticas que hacen que su uso no sea posible en un gran abanico de aplicaciones. La causa radica en que la relación entre el error de profundidad y la extensión lateral medida es una constante que sólo depende de la geometría del sistema. Por lo tanto, si tenemos un sistema de triangulación activa cuya geometría no puede ser modificada, la resolución en profundidad viene fijada por el campo de visión del sistema. De este modo, para medir grandes áreas con alta resolución en profundidad —lo que es lo mismo que tener un error de profundidad bajo— es necesario utilizar técnicas de multiresolución.

En este capítulo se presenta una técnica novedosa de multiresolución basada en un sistema formado por una cámara y un proyector inicialmente calibrado y una segunda cámara auxiliar que se puede mover con total libertad. El método consiste en realizar inicialmente una medida con un gran campo de vista (medida extensa). Seguidamente, la configuración geométrica del sistema se modifica y se adquiere una segunda medida con un campo de vista pequeño (medida precisa), que es referida al sistema de referencia original mediante la cámara auxiliar. Mediante este método es posible obtener una reconstrucción con multiresolución sin necesidad de realizar ningún proceso de optimización, registro o recalibración. Los resultados experimentales obtenidos muestran una reducción de aproximadamente un orden de magnitud en el error de profundidad entre la medida precisa y la extensa. Por otra parte, se ha aplicado con éxito este método a la detección de defectos superficiales en grandes planchas aeronáuticas. El trabajo presentado en este capítulo ha dado lugar a las siguientes publicaciones, una referenciada [Vargas 08] y otra sin referenciar [VQ 08].

4.1 Introducción

Una de las características de los sistemas de medida 3D mediante triangulación es que el cociente entre la resolución en profundidad y la extensión lateral medida es una constante que depende de la geometría del sistema de triangulación. Por tanto, existe un compromiso entre la extensión lateral que se desea medir y la resolución en profundidad que puede obtenerse. Si se quiere obtener una medida con una gran extensión lateral y un pequeño error de profundidad es necesario modificar el sistema de triangulación en tiempo de medida, esto es, cambiar la base de triangulación así como los parámetros intrínsecos y/o extrínsecos de la cámara y del proyector. El problema radica en que al modificar la geometría del dispositivo es necesario recalibrar el sistema. En el Capítulo 3 se ha explicado con detalle los dos métodos de calibración más usados para un sistema de triangulación activa, polinomiales y basados en modelo. En ambos métodos, el proceso de calibración requiere el uso de objetos especiales, como por ejemplo un plano con marcas. Estos métodos precisan una cantidad considerable de tiempo en llevarse a cabo y no son automáticos. De esta forma, cuando es necesario adaptar un sistema para trabajar en diferentes resoluciones de profundidad no resulta práctico modificar el sistema, para realizar una calibración posteriormente. En estos casos, es necesario utilizar técnicas de multiresolución [Andrá 97] [Kayser 99][Osten 99][Wiora 00][SHNR 01][Notni 01][Kayser 04].

La mayoría de las técnicas de multiresolución [Wiora 00][SHNR 01] [Notni 01] dividen la superficie a inspeccionar en pequeñas áreas realizando una medida en cada una de estas. Estas regiones están elegidas de forma que estén solapadas entre sí. El registro de las distintas áreas se realiza o usando un conjunto de marcas dispuestas sobre la superficie del objeto [Fiala 04] o midiendo la posición del sistema de medida 3D que se desplaza para escanear cada pequeña región [SHNR 01]. La Figura 4.1 muestra el prototipo desarrollado por Wiora y una medida obtenida por este. En la Figura 4.1 (b) cada región coloreada consiste en una medida sobre una pequeña región. Este método de multiresolución tiene el inconveniente de que siempre es necesario realizar un proceso de registro de vistas lo que supone un problema sobre todo en el caso de superficies suaves.

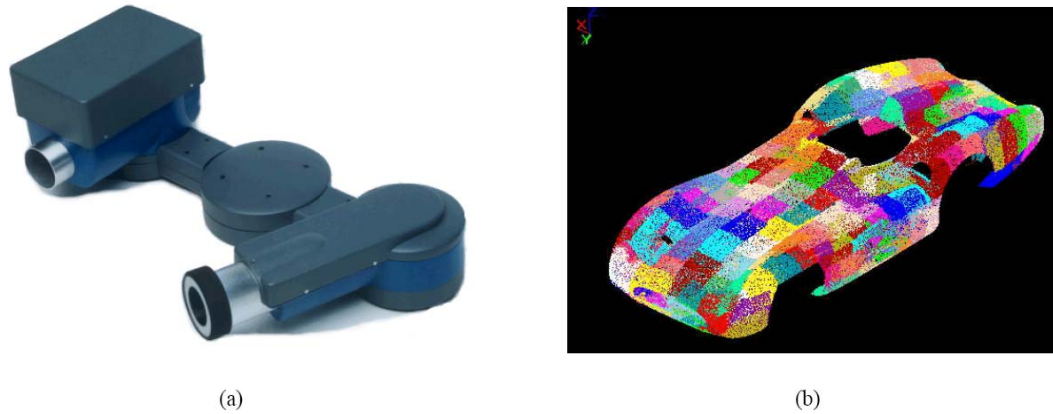


Figura 4.1 En (a) se muestra el prototipo GMD 3000 desarrollado por Wiora [Wiora 00]. En (b) se muestra la nube de puntos obtenida mediante el prototipo GMD 3000 al medir un Mercedes “Silver-Arrow”. Cada región coloreada consiste en una medida individual. (<http://www.daimler.com>)

Una alternativa ha sido propuesta por Kayser et al [Kayser 04]. En esta técnica inicialmente se obtiene una medida 3D de baja resolución de toda la superficie mediante un sistema de triangulación activa. Para inspeccionar con alta resolución los pequeños detalles sobre la superficie se utiliza un segundo sistema de medida. En el trabajo de Kayser el segundo sistema de medida es un microscopio confocal que puede moverse en las tres direcciones del espacio con la finalidad de inspeccionar las regiones de interés. El registro entre la medida obtenida por el sistema de triangulación activa y las medidas obtenidas por el microscopio confocal, se realiza automáticamente. Esto es posible gracias a un sistema de posicionamiento externo. Finalmente, se realiza un proceso de refinamiento del registro de vistas usando el método ICP (*Iterative Closest Point*) [Besl 92][Eggert 98].

El problema de calibrar de forma dinámica un sistema adaptativo de medida 3D ha sido un área de estudio en los últimos años. Se entiende por sistema adaptativo aquel dispositivo cuyos sistemas ópticos (cámara y proyector) pueden cambiar sus parámetros intrínsecos y/o extrínsecos en tiempo de medida. Los parámetros intrínsecos se modifican al variar el zoom o el foco de la cámara o del proyector, mientras que los parámetros extrínsecos se cambian al modificar sus posiciones respectivas. Un sistema que cambia sus parámetros en tiempo de

medida tiene que ir siendo calibrado dinámicamente al ir modificándose. Para calibrar un sistema de este tipo en tiempo de medida, es posible usar un método de autocalibración [HZ 00][Schereiber 00] o de recalibración [Lie 03]. Los métodos de autocalibración no requieren el uso de objetos especiales de calibración y por tanto este proceso se puede realizar como parte del procedimiento de medida; de esta forma los parámetros óptimos de calibración siempre están garantizados. Por otra parte, en los procedimientos de recalibración es necesaria una calibración previa del sistema para actualizar los parámetros tras un cambio en el sistema de medida. Cualquiera de estos dos métodos (autocalibración o recalibración) requieren el uso de optimizaciones no lineales [HZ 00] o el uso de lo que se conoce en la literatura como indicadores o *cues* que pueden ser de desenfoque o foco [Lie 03].

En este capítulo se presenta un método que no necesita dividir la superficie en pequeñas áreas realizando una medida individual en cada una de ellas como en los trabajos [Wiora 00][Steinbichler 01][Notni 01]. En nuestro caso, como en el trabajo de Kayser et al [Kayser 04] inicialmente se obtiene una medida de la superficie extensa y posteriormente una nueva medida para detectar los pequeños detalles. Existen dos grandes diferencias entre el método presentado en este capítulo y el método propuesto por Kayser et al. Inicialmente, en la técnica que se va a mostrar no es necesario usar dos métodos de medida distintos como un sistema de proyección de franjas y un microscopio confocal. En este método se usa un único sistema de proyección de franjas para obtener la medida extensa y precisa. Para trabajar en diferentes resoluciones de profundidad se cambian los parámetros internos y externos de la cámara y el proyector. Por otra parte, el método presentado es capaz de obtener una reconstrucción métrica sin necesidad de realizar ninguna optimización, registro o proceso de recalibración o autocalibración.

El dispositivo de medida 3D consiste en un sistema de triangulación activo formado por una cámara y un proyector inicialmente calibrado y una segunda cámara auxiliar que puede moverse con total libertad. Los parámetros internos y externos de esta segunda cámara auxiliar no se necesitan conocer. Esto es debido a que la cámara auxiliar únicamente obtiene medidas de fase que son referidas a

la cámara principal desde donde son trianguladas. Esto es una ventaja de gran importancia debido a que por una parte hace que no sea necesario el uso de sistemas de posicionamiento precisos y, por otra parte, no es necesario el uso de procesos de recalibración o autocalibración.

El procedimiento de medida del método propuesto consiste en realizar inicialmente una medida extensa de toda la superficie. Esta medida nos proporciona una información de la forma global del objeto a medir y posee una resolución en profundidad baja. Seguidamente, la configuración geométrica del sistema de triangulación se modifica para obtener una medida precisa. Esta medida inspecciona una pequeña área con gran resolución en profundidad. Estas dos medidas con diferentes resoluciones se relacionan gracias a una medida auxiliar haciéndose posible la medida de multiresolución.

4.2 Fundamento Teórico

En este apartado se expone el fundamento teórico que explica de que parámetros depende la resolución en profundidad en un sistema de triangulación activa (apartado 4.2.1). Seguidamente se introduce el proceso de medida del método de multiresolución propuesto (apartados 4.2.2, 4.2.3 y 4.2.4).

4.2.1 Resolución en profundidad para un sistema de triangulación activa

En un sistema de medida 3D el parámetro más significativo es la resolución en profundidad. En triangulación activa, la resolución en profundidad está determinada por el error obtenido en la medida de la fase, por el ángulo de triangulación y por la limitación introducida debida al muestreo de las imágenes, que limita la frecuencia espacial de las franjas. En el trabajo de Kayser et al [Kayser 04] se proporciona la expresión analítica del error en profundidad para un sistema de proyección de franjas,

$$\partial z \geq \frac{N \cdot \Delta \Phi}{2\pi \cdot i_{cam} \cdot \tan \theta} X_{obj} \quad (4.1)$$

donde N es el número de píxeles por periodo de la franja proyectada más fina, X_{obj} es la anchura del área medida en la dirección perpendicular a la modulación de las franjas, i_{cam} es el número de píxeles de la cámara en la misma dirección, θ corresponde al ángulo de triangulación entre la cámara y el proyector, y $\Delta \Phi$ representa el error en la recuperación de la fase.

En (4.1) se puede aproximar $\sqrt{A} \approx X_{obj}$, donde A corresponde al área observada. De esta forma se obtiene a partir de (4.1) una expresión para el error en profundidad independiente del área observada como,

$$\partial z_A = \frac{\partial z}{\sqrt{A}} \geq \frac{N \cdot \Delta \Phi}{2\pi \cdot i_{cam} \cdot \tan \theta}, \quad (4.2)$$

Es importante observar que la expresión (4.2) es fija para un sistema de proyección de franjas cuyos parámetros intrínsecos y/o extrínsecos no puedan modificarse. Valores típicos de los distintos parámetros pueden ser,

$N = 3 \text{ px}$
$\Delta \Phi = 0.01 \text{ rad}$
$i_{cam} = 1024 \text{ px}$
$\theta = 0.5 \text{ rad}$

Con estos valores se obtiene un valor típico $\partial z_A \cong 10^{-4}$. Esto significa que al medir con un sistema de triangulación activa un área de aproximadamente 1 m^2 se debe esperar obtener una resolución en profundidad de aproximadamente $\partial z \cong 0.1 \text{ mm}$. En el caso de que sea necesario mejorar este valor es inevitable modificar el sistema de medida. Las expresiones (4.1) y (4.2) muestran que para incrementar la resolución de profundidad es necesario reducir el error en la recuperación de la

fase ($\Delta\Phi$), reducir la anchura de las franjas proyectadas sobre el objeto (N) e incrementar el ángulo de triangulación (θ). Obsérvese que aumentar el ángulo de triangulación es totalmente equivalente a aumentar la base de triangulación. Para reducir el error de la fase ($\Delta\Phi$) y la anchura de las franjas proyectadas (N) se puede reducir el área observada y proyectada por la cámara y el proyector respectivamente.

En la Figura 4.2 se muestra un esquema del procedimiento para aumentar la sensibilidad en profundidad de un sistema de proyección de franjas. En la Figura 4.2 (a) aparece un sistema de triangulación activa formado por una cámara y un proyector observando un objeto. En la Figura 4.2 (b) se muestra el mismo sistema pero en este caso tanto la cámara como el proyector observan un área más pequeña con un mayor ángulo de triangulación. Por tanto, la sensibilidad en profundidad será mayor en la configuración (b) que en la (a). Nótese también que la superficie observada en (a) es mayor que la detectada en (b).

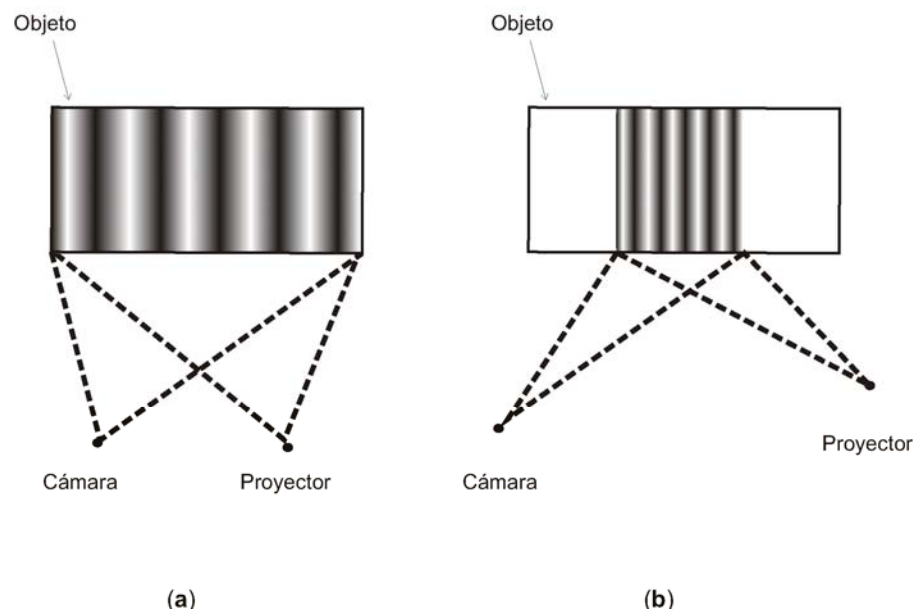


Figura 4.2 En (a) se muestra un sistema de triangulación activa observando un área con baja resolución en profundidad. En (b) se observa el mismo sistema mostrado en (a) con alta resolución en profundidad.

Como ya se ha explicado, al medir un objeto de 1 m^2 de área mediante un sistema de triangulación activa con valores típicos se debe esperar alcanzar una

resolución en profundidad de 0.1 mm. Si es necesario medir un objeto de 1 m² pero las tolerancias de fabricación requieren que en determinadas partes se obtengan resoluciones en profundidad de 0.01 mm se necesita modificar la configuración del sistema. De esta forma es puede fusionar dos medidas, una medida extensa capaz de medir un área de 1 m² y una resolución en profundidad de 0.1 mm y una medida precisa observando un área menor pero con una resolución de profundidad de 0.01 mm. Esta técnica se denomina multiresolución.

En este capítulo, se propone obtener una medida de multiresolución mediante tres medidas en diferentes configuraciones. Inicialmente, se adquiere una medida extensa con un gran campo de vista usando la cámara fija. Seguidamente, se obtiene una medida precisa con un menor campo de vista y observando los pequeños detalles del objeto. Finalmente, se obtiene una medida auxiliar con la única finalidad de relacionar las medidas extensa y precisa. Tanto la medida precisa como la auxiliar se obtienen con la cámara auxiliar que puede moverse con total libertad. Nótese que la cámara auxiliar y la cámara principal o fija pueden ser la misma cámara. No obstante el hecho de usar una cámara auxiliar distinta e independiente incrementa la flexibilidad del sistema debido a que en este caso es posible aumentar el ángulo de triangulación y seleccionar la región en la que se va a realizar la medida precisa. La principal dificultad del método propuesto radica en el proceso de relacionar las medidas de las diferentes configuraciones (extensa, auxiliar y precisa). Para relacionar las distintas medidas se obtienen las correspondencias entre la cámara principal y la auxiliar usando la fase absoluta como si fuera un conjunto de marcas sobre el objeto. El resultado final del método propuesto consiste en dos medidas superpuestas con diferentes resoluciones en profundidad y diferentes campos de visión. En los siguientes apartados se explican en detalle los diferentes pasos del método.

4.2.2 Medida global de la superficie. Medida extensa

Como ya se ha mencionado, el método propuesto está basado en el uso de un sistema de triangulación activa constituido por una cámara y un proyector y una segunda cámara auxiliar que puede moverse con total libertad.

La cámara principal o fija y auxiliar tienen sistemas de referencia que serán denotados por $[u_{C,f}, v_{C,f}]$ y $[u_{C,aux}, v_{C,aux}]$ respectivamente. El proyector trabaja en dos configuraciones, configuración sin zoom y configuración con zoom con sistemas de referencia denotados por $[u_p, v_p]$ y $[\bar{u}_p, \bar{v}_p]$ respectivamente. La Figura 4.3 muestra un esquema del sistema. La cámara principal y el proyector forman un sistema de triangulación rígido y previamente calibrado.

Para obtener una medida en multiresolución mediante el método propuesto es necesario computar la fase absoluta en las dos direcciones de los ejes del proyector. La fase absoluta se obtiene mediante el método Gray-Code y Phase-Shifting [Krattenthaler 93][Sansoni 99]. Inicialmente se obtiene una medida 3D a partir de la fase absoluta obtenida con la cámara principal y el proyector (en la configuración sin zoom) $[\Phi_x, \Phi_y]$. Este sistema rígido (cámara principal-proyector) está inicialmente calibrado y observa una gran área del objeto.

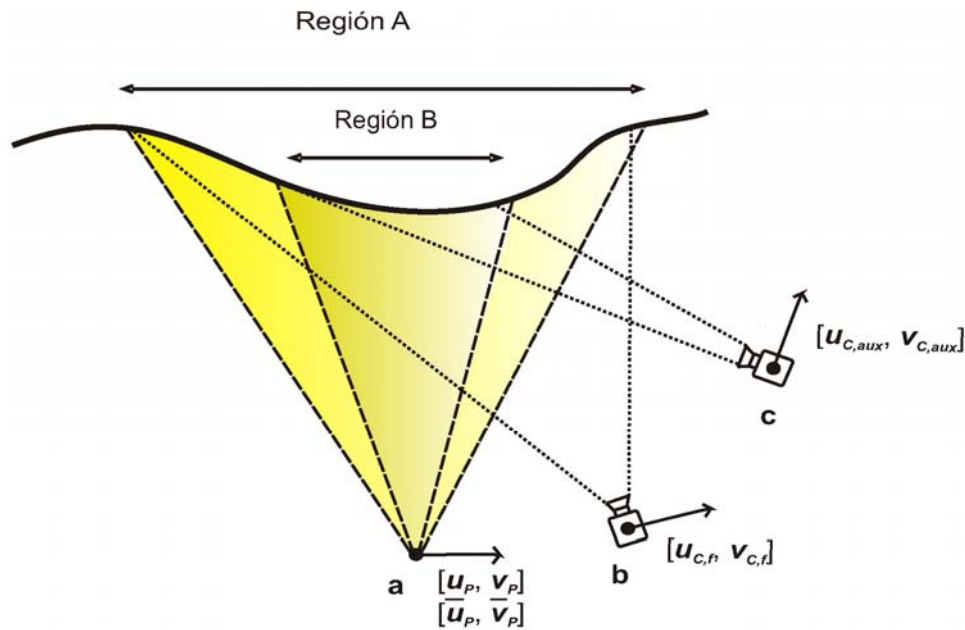


Figura 4.3 Esquema de triangulación usado en el método propuesto, donde (a) es el proyector, (b) es la cámara principal (c) es la cámara auxiliar.

En la Figura 4.3 la Región A muestra el área de esta medida. A esta medida extensa obtenida mediante el sistema rígido formado por la cámara principal y el proyector se la llama medida extensa.

4.2.3 Correspondencias entre las cámaras auxiliar y principal

En el siguiente paso del método, la cámara auxiliar se coloca con un mayor ángulo de triangulación y observando una pequeña área sobre el objeto donde se encuentran los detalles a inspeccionar. En la Figura 4.3 puede observarse esta configuración. Una nueva medida de la fase —medida de fase auxiliar— se obtiene mediante la cámara auxiliar y el proyector $[\phi_x, \phi_y]$. Es importante recalcar que no se ha modificado el proyector respecto a su configuración en la medida anterior.

Debido a que el proyector no se ha modificado, la fase absoluta proyectada no ha cambiado. Por tanto, mediante el uso de la restricción epipolar [HZ 00] —restricción geométrica que limita el rango de búsqueda de correspondencias para un punto en una imagen a una línea en otra imagen— es posible obtener las correspondencias entre los planos retinales de la cámaras principal y auxiliar mediante una búsqueda directa usando la fase absoluta. Las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6 clarifican el proceso de obtención de las correspondencias entre la cámara principal y auxiliar.

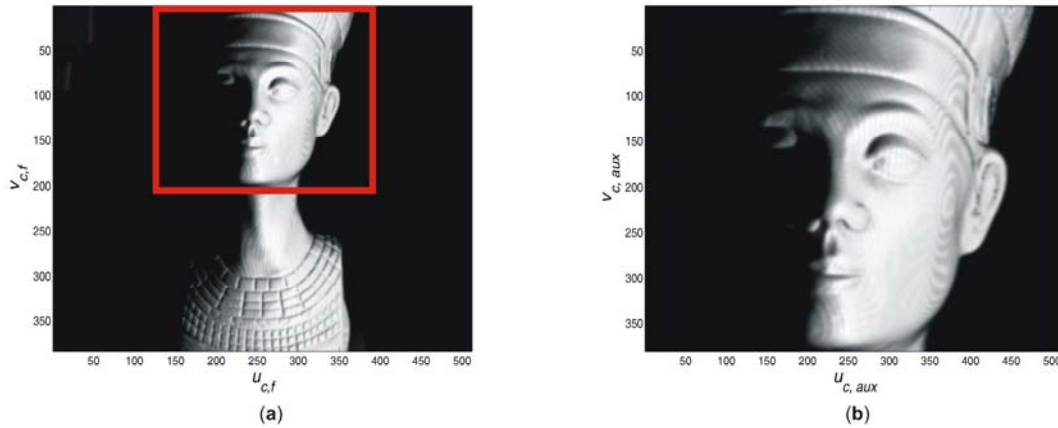


Figura 4.4 En (a) se muestra un objeto observado por la cámara principal. En (b) se observa el mismo objeto observado por la cámara auxiliar. La región estudiada por la cámara auxiliar corresponde a la región marcada mediante un cuadrado rojo en (a)

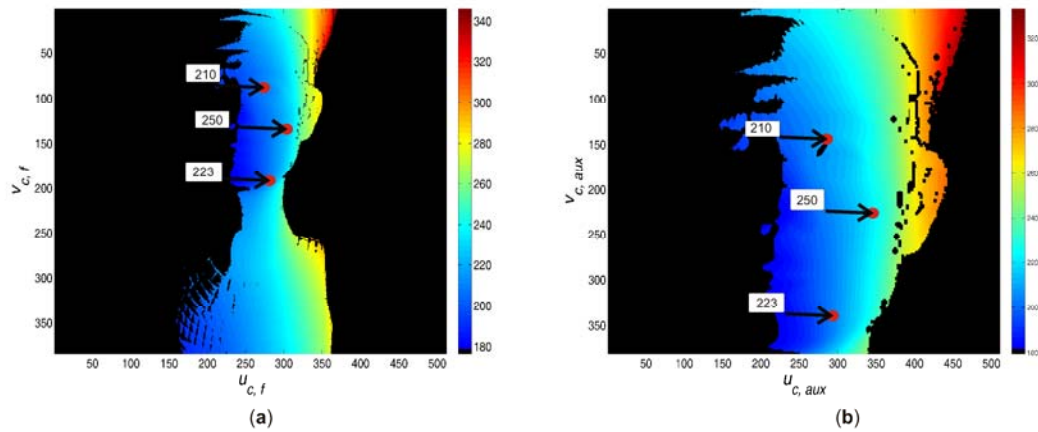


Figura 4.5 Fase absoluta paralela al eje X del proyector proyectada sobre el objeto mostrado en la Figura 4.4 y observada mediante la cámara principal (a) y la cámara auxiliar (b). Se muestran también una serie de valores de la fase en distintos puntos. Todos estos valores están dados en radianes.

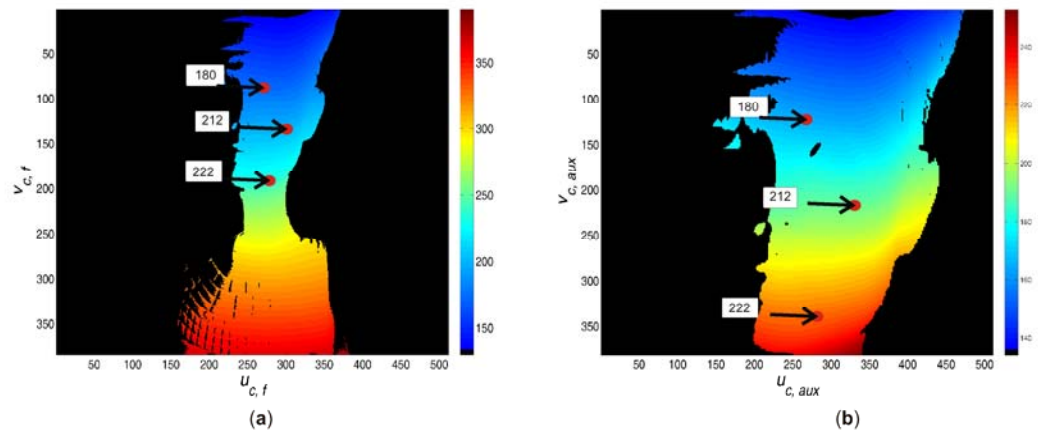


Figura 4.6 Fase absoluta paralela al eje Y del proyector proyectada sobre el objeto mostrado en la Figura 4.4 y observada mediante la cámara principal (a) y la cámara auxiliar (b). Se muestran también una serie de valores de la fase en distintos puntos. Todos estos valores están dados en radianes.

En la Figura 4.4 se muestra una imagen de un objeto obtenida por la cámara principal (a) y la cámara auxiliar (b). El rectángulo rojo sobre la Figura 4.4 (a) muestra la región observada por la cámara auxiliar, que es mucho menor que la medida por la cámara principal. En La Figura 4.5 se muestra la fase absoluta en el eje X proyectada sobre el objeto mostrado en la Figura 4.4. En la Figura 4.5 se

muestran una serie de valores de la fase absoluta para puntos correspondientes entre la cámara principal y la auxiliar. Como puede observarse el valor de la fase es idéntico en dichos puntos correspondientes. Finalmente en la Figura 4.6 se muestra la fase absoluta en el eje Y . En la Figura 4.6 también aparecen un conjunto de valores de la fase para puntos correspondientes.

El resultado final del procedimiento de obtención de las correspondencias entre la cámara principal y la auxiliar es un mapa, que relaciona cada píxel de la cámara auxiliar $[u_{C,aux}, v_{C,aux}]$ con su píxel correspondiente en la cámara principal $[u_{C,f}, v_{C,f}]$ de la forma $u_{C,f} = L(u_{C,aux}, v_{C,aux})$ y $v_{C,f} = M(u_{C,aux}, v_{C,aux})$.

4.2.4 Medida en Multiresolución

Una vez que los mapas de correspondencias entre la cámara principal y auxiliar han sido determinados se procede a incrementar el zoom del proyector (Región B de la Figura 4.2). En esta nueva configuración se obtiene una nueva medida de la fase mediante la cámara auxiliar, ϕ_x . Es importante observar que en este caso no es necesario obtener dos fases ortogonales.

La Figura 4.7 muestra un conjunto de imágenes del patrón de franjas más fino proyectado en las distintas configuraciones.

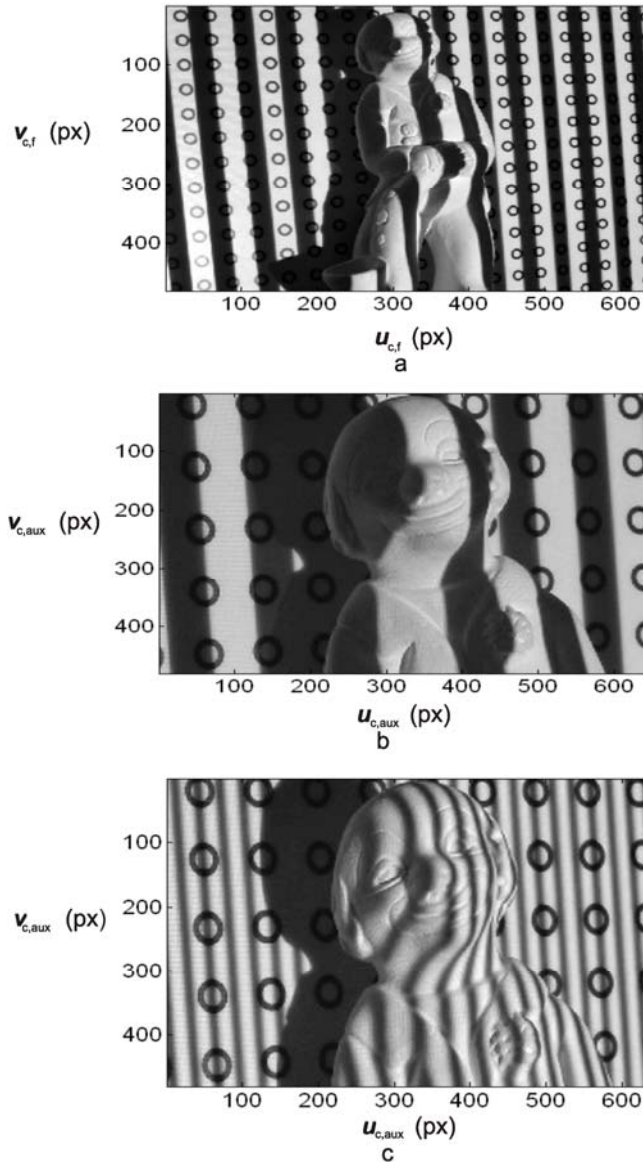


Figura 4.7. Conjunto de imágenes del patrón de franjas más fino proyectado en las distintas configuraciones. En (a) se muestra la imagen obtenida mediante la cámara principal y el proyector sin zoom, en (b) mediante la cámara auxiliar y el proyector sin zoom. Finalmente en (c) mediante la cámara auxiliar y el proyector en la configuración con zoom.

En la Figura 4.7 (a) se muestra la imagen del patrón de franjas obtenida por la cámara principal y con el proyector en la configuración sin zoom. Las Figuras 4.7 (b) y (c) han sido obtenidas mediante la cámara auxiliar y el proyector en la configuración sin zoom y con zoom respectivamente. Obsérvese que la Figura 4.7(a) muestra una imagen de todo el objeto, mientras que en (b) y (c) sólo se muestra una pequeña región de éste. Por otra parte, es importante hacer notar el

diferente tamaño de las franjas entre la Figura 4.7 (b) y (c) debido a la diferente configuración del proyector. De esta forma, aunque en (b) y en (c) se observa el mismo área, en (c) aparece un mayor número de franjas que en (b).

El paso final del procedimiento de multiresolución consiste en determinar la relación entre φ_x (fase absoluta obtenida con la cámara auxiliar y el proyector en la configuración con zoom) y la medida auxiliar de fase ϕ_x (fase absoluta obtenida con la cámara auxiliar y el proyector en la configuración sin zoom). Como ya se ha explicado en el Capítulo 2, el proyector puede ser modelado como una cámara *pin-hole* inversa. De esta forma la relación entre los puntos 3D referidos respecto un sistema de referencia del mundo y la imagen de dichos puntos en el plano retinal del proyector viene dada por,

$$s \begin{pmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{pmatrix} = K_p [R_p | \mathbf{t}_p] \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

con

$$K_p = \begin{pmatrix} f_p^x & 0 & c_p^x \\ 0 & f_p^y & c_p^y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

y,

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{pmatrix} = [R_p | \mathbf{t}_p] \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

donde, s es un factor de escala arbitrario, K_p es la matriz de intrínsecos del proyector formada por las distancias focales en píxeles f_p^x y f_p^y y las coordenadas del punto principal c_p^x y c_p^y . Las coordenadas 3D referidas en el

sistema de referencia del mundo y en coordenadas homogéneas, $[X_w, Y_w, Z_w, 1]^T$ se relacionan con las coordenadas 3D referidas en el sistema de referencia del proyector $[X_p, Y_p, Z_p, 1]^T$ mediante la matriz de roto-traslación $[R_p | \mathbf{t}_p]$. En (4.4) se ha considerado que el factor de rombocidad o *skew* es cero, lo que es el caso habitual.

La expresión (4.3) puede ser reescrita en términos de fase en vez de coordenadas. Esto es debido a que la fase absoluta proyectada paralelamente a ambos ejes X e Y del proyector es directamente proporcional a las coordenadas u_p y v_p respectivamente.

Si los parámetros intrínsecos del proyector cambian sin que se modifiquen los parámetros extrínsecos, por ejemplo variando el zoom del proyector, la imagen de los puntos 3D en el plano retinal del proyector vienen dados por,

$$s \begin{pmatrix} \bar{u}_p \\ \bar{v}_p \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{f}_p^x & 0 & \bar{c}_p^x \\ 0 & \bar{f}_p^y & \bar{c}_p^y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} [I | \mathbf{0}] \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

donde, s es de nuevo el factor de escala arbitrario, I es la matriz 3×3 identidad, $\mathbf{0}$ es el vector 3×1 nulo, \bar{f}_p^x , \bar{f}_p^y , \bar{c}_p^x , \bar{c}_p^y son los nuevos parámetros intrínsecos del proyector, $[\bar{u}_p, \bar{v}_p, 1]^T$ corresponde a las nuevas coordenadas correspondientes de $[X_p, Y_p, Z_p, 1]^T$ en el plano imagen del proyector usando el modelo de proyección lineal.

De las expresiones (4.3) y (4.6) podemos relacionar $[u_p, v_p, 1]^T$ con $[\bar{u}_p, \bar{v}_p, 1]^T$ mediante,

$$\begin{pmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \frac{f_p^x}{\bar{f}_p^x} & 0 & -\bar{c}_p^x \frac{f_p^x}{\bar{f}_p^x} + c_p^x \\ 0 & \frac{f_p^y}{\bar{f}_p^y} & -\bar{c}_p^y \frac{f_p^y}{\bar{f}_p^y} + c_p^y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{u}_p \\ \bar{v}_p \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

La expresión (4.7) representa una transformación afín general que puede obtenerse mediante 2 puntos. Obteniendo \bar{u}_p mediante (4.7) y restándole u_p se obtiene,

$$(u_p - \bar{u}_p) = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\bar{f}_p^x}{f_p^x} & 0 & -c_p^x \frac{\bar{f}_p^x}{f_p^x} + \bar{c}_p^x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

La expresión (4.8) representa la ecuación de un plano en (u_p, v_p) . Teniendo en cuenta que u_p y \bar{u}_p son proporcionales a ϕ_x y φ_x respectivamente tenemos que,

$$\phi_x - \varphi_x = \lambda^{-1} \begin{pmatrix} 1 - \frac{\bar{f}_p^x}{f_p^x} & 0 & -c_p^x \frac{\bar{f}_p^x}{f_p^x} + \bar{c}_p^x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

donde, λ corresponde a $\lambda = \frac{R_x}{2 \cdot \pi \cdot F}$ con R_x la resolución del proyector en el eje X y F el número de franjas proyectadas con frecuencia espacial más alta. Es importante observar que la expresión (4.9) ha sido obtenida en coordenadas del proyector y asumiendo que éste no se ve afectado por la distorsión. Si el objeto a medir es un plano, la relación entre las coordenadas del proyector $[u_p, v_p, 1]^T$ y las coordenadas de la cámara auxiliar $[u_{c,aux}, v_{c,aux}, 1]^T$ se puede expresar como:

$$\begin{pmatrix} u_{c,aux} \\ v_{c,aux} \\ 1 \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

donde, H es una homografía —matriz 3×3 que representa una transformación proyectiva del plano proyectivo P^2 al plano proyectivo P^2 — [HZ 00]. Por tanto, si el objeto a medir es un plano, la diferencia de fase $\phi_x - \varphi_x$ en la cámara auxiliar vendrá dada también por un plano de la forma,

$$\phi_x - \varphi_x = Au_{C,aux} + Bv_{C,aux} + C \quad (4.11)$$

Como ya se mencionó anteriormente, debido a la diferente configuración geométrica del sistema de triangulación activa, la resolución de ϕ_x y φ_x es distinta; siendo más baja para ϕ_x que para φ_x . De esta forma es posible obtener una versión mejorada de ϕ_x a partir de φ_x . Para ello, se realiza un ajuste lineal de la diferencia $\varphi_x - \phi_x$ sobre toda la imagen en coordenadas de cámara auxiliar para obtener la versión mejorada de ϕ_x como,

$$\hat{\phi}_x = \hat{A}u_{C,aux} + \hat{B}v_{C,aux} + \hat{C} + \varphi_x \quad (4.12)$$

donde, \hat{A} , \hat{B} y \hat{C} son los coeficientes obtenidos al ajustar a un plano $\phi_x - \varphi_x$ respecto $u_{C,aux}$ y $v_{C,aux}$

Obsérvese que en la expresión (4.12) los coeficientes \hat{A} , \hat{B} y \hat{C} han sido obtenidos realizando el ajuste lineal a toda la imagen de la cámara auxiliar, asumiendo que la distorsión es despreciable y que el objeto a medir es un plano. Si la distorsión no es despreciable o el objeto a medir no es un plano, las expresiones (4.11) y (4.12) no son adecuadas para realizar el ajuste de forma global pero continúan siendo válidas si se utilizan localmente. Esto significa que las expresiones (4.11) y (4.12) son aplicables si tomando una pequeña región del objeto (de típicamente 5×5 px) esta se puede aproximar de forma conveniente por un plano. Esta aproximación es válida para los objetos en los que se va a aplicar el método propuesto y que consisten en planchas aeronáuticas extensas con pequeñas indentaciones. De esta forma, en un sistema de medida real, con distorsión, el ajuste representado por la expresión (4.12) se puede realizar localmente dentro de pequeñas vecindades de típicamente 5×5 px.

Una vez que se ha calculado la fase $\hat{\phi}_x$, se obtiene a partir de ella una fase absoluta mejorada —con mayor resolución en profundidad— y referida respecto al sistema de referencia fijo formado por la cámara principal y el proyector como,

$$[u_{C,f}, v_{C,f}, \hat{\Phi}_x(u_{C,f}, v_{C,f})] = [L(u_{C,aux}, v_{C,aux}), M(u_{C,aux}, v_{C,aux}), \hat{\phi}_x(u_{C,aux}, v_{C,aux})] \quad (4.13)$$

Donde, L y M son los mapas de correspondencias que habían sido obtenidos previamente. Finalmente el vector $[u_{C,f}, v_{C,f}, \hat{\Phi}_x(u_{C,f}, v_{C,f})]$ es transformado en 3D cartesianas usando la calibración previa del sistema formado por la cámara principal y el proyector. La Figura 4.8 muestra un esquema del proceso de medida.

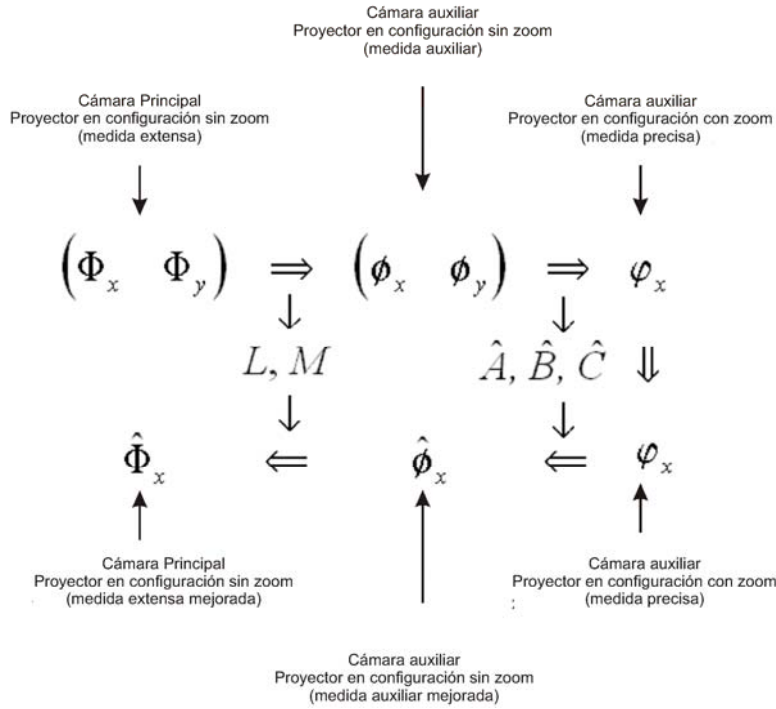


Figura 4.8. Esquema del proceso de medida en el método de multiresolución propuesto.

El método de multiresolución presentado permite obtener una medida en multiresolución de forma muy flexible y dinámica. No requiere el uso de optimizaciones no lineales o procesos de registro gracias al carácter lineal de las expresiones (4.10) y (4.11). Por otra parte, el método propuesto permite la

utilización de una cámara auxiliar que puede moverse con libertad y que no tiene que ser calibrada. De esta forma, en el método propuesto únicamente es necesario realizar una calibración previa del sistema formado por la cámara principal y el proyector.

4.3 Resultados Experimentales

El método introducido en el apartado 4.2 ha sido probado usando un sistema de triangulación rígido formado por una cámara CCD Olympus C-750 UZ y un proyector DLP Mitsubishi LVP-200E previamente calibrados. Adicionalmente se ha usado una cámara CCD Olympus C-750 UZ que puede moverse con libertad así como cambiar su zoom programáticamente.

Para demostrar la efectividad del método, se han medido dos objetos; una pirámide formada con papeles de diferentes grosores y una pirámide de metal mecanizada a la centésima de milímetro. Adicionalmente, se ha aplicado la técnica de multiresolución a la inspección de superficies aeronáuticas extensas que tienen una serie de pequeñas indentaciones o defectos superficiales. Mediante la técnica de multiresolución se desea medir esta superficie globalmente, y caracterizar los pequeños defectos sobre la misma. La pirámide de papel, tiene unas dimensiones laterales de $120 \times 120 \text{ mm}^2$ con tres escalones en altura de tamaños aproximados de 0.1, 0.5 y 0.8 todos en mm medidos mediante un microscopio comparador. La pirámide metálica tiene unas dimensiones laterales de $110 \times 110 \text{ mm}^2$ con cuatro escalones en altura de tamaños 0.1, 1 y 5 y 10 todos en mm. Esta pirámide está mecanizada a la centésima de milímetro. En las Figuras 4.9 y 4.10 se muestran imágenes de las pirámides. En la Figura 4.9 se muestra una línea discontinua en la fila 180 px mientras que en la Figura 4.10 se muestra una línea continua sobre parte de la fila 200 px. Sobre estas líneas se van a mostrar seguidamente perfiles de diferentes magnitudes.

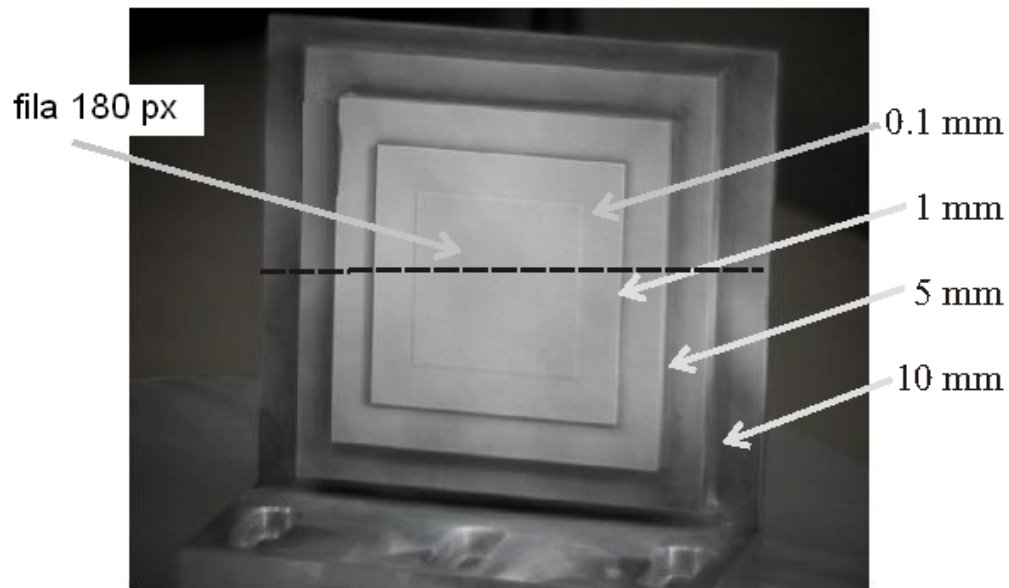


Figura 4.9. Pirámide metálica mecanizada con los distintos escalones indicados. Se muestra la fila 180 px mediante una línea discontinua negra.

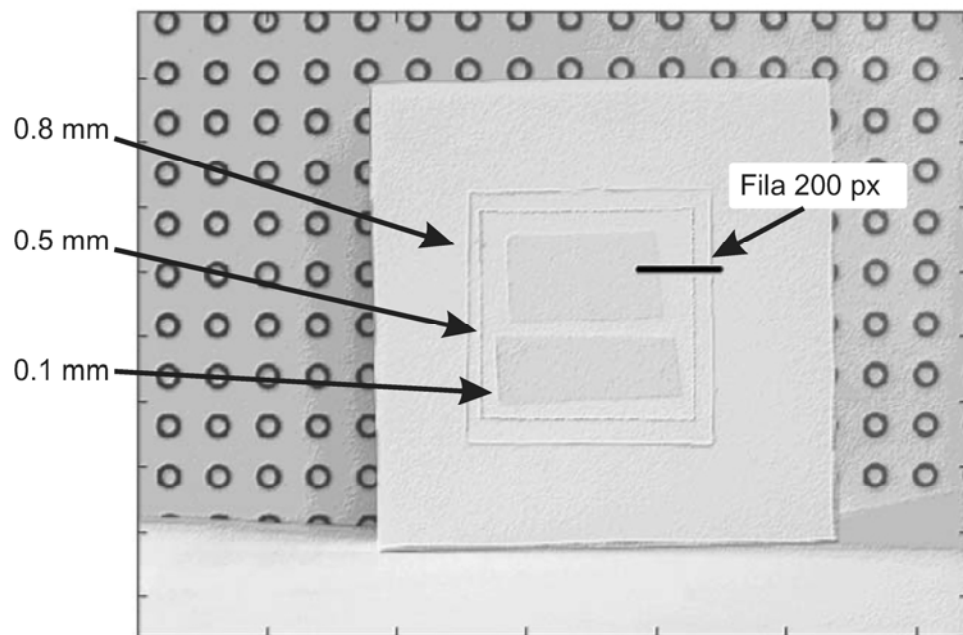


Figura 4.10. Pirámide de papel con los distintos escalones indicados. Se muestra parte de la fila 200 px mediante una línea negra.

La Figura 4.11 muestra un perfil sobre parte de la fila 200 px de la fase auxiliar ϕ_x , de la fase fina ϕ_x y de la fase mejorada $\hat{\phi}_x$ para la pirámide mostrada en la Figura 4.9.

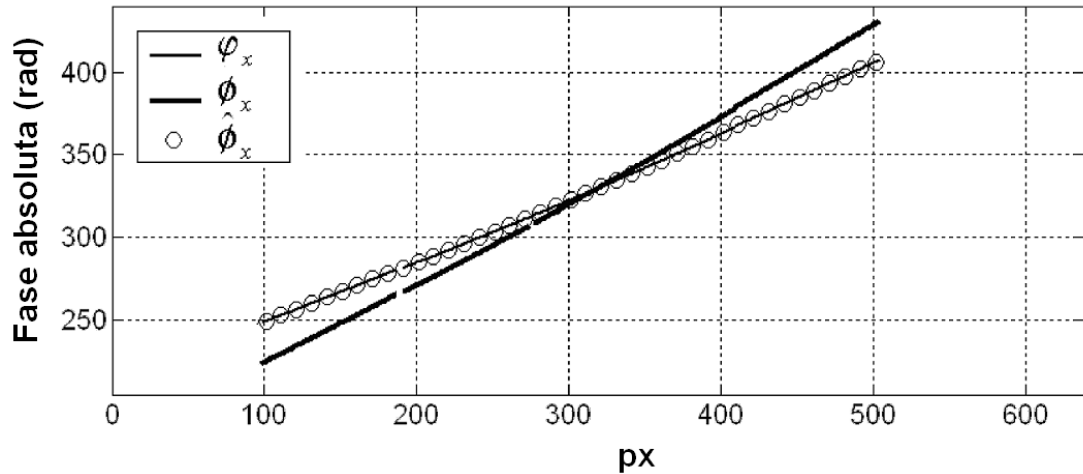


Figura 4.11. Perfil de las fases absolutas ϕ_x , ϕ_x y $\hat{\phi}_x$ para la fila 200 px mostrada en la Figura 4.10 mediante una línea negra.

En la Figura 4.11 se observa que las pendientes de ϕ_x y ϕ_x son claramente distintas. Esta diferencia en las pendientes se debe a la distinta frecuencia espacial de las franjas proyectadas y puede observarse desde un punto de vista matemático a partir de la expresión (4.9). La expresión (4.9) muestra que una diferencia en los parámetros internos del proyector provoca una diferencia de pendiente entre ϕ_x y ϕ_x . Para cuantificar la concordancia entre ϕ_x y $\hat{\phi}_x$ se representa en la Figura 4.12 su diferencia a través de la fila 200 px. En la Figura 4.12 se observa que la media de la diferencia entre ϕ_x y $\hat{\phi}_x$ es aproximadamente cero, siendo exactamente 0.002 rad. Por otra parte, la desviación estándar es de 0.07 rad.

Para mostrar el aumento de resolución en profundidad y por tanto la disminución del error en la profundidad se muestra en las Figura 4.13 y 4.14 la norma del gradiente en cada píxel para Φ_x y $\hat{\phi}_x$ respectivamente. En la Figura 13, que muestra la norma del gradiente para Φ_x , sólo es apreciable el escalón más grande de 0.8 mm. En la Figura 4.14 todos los escalones se aprecian con claridad.

Por otra parte también se observa que el nivel de ruido es menor en la Figura 4.13 que en 4.14

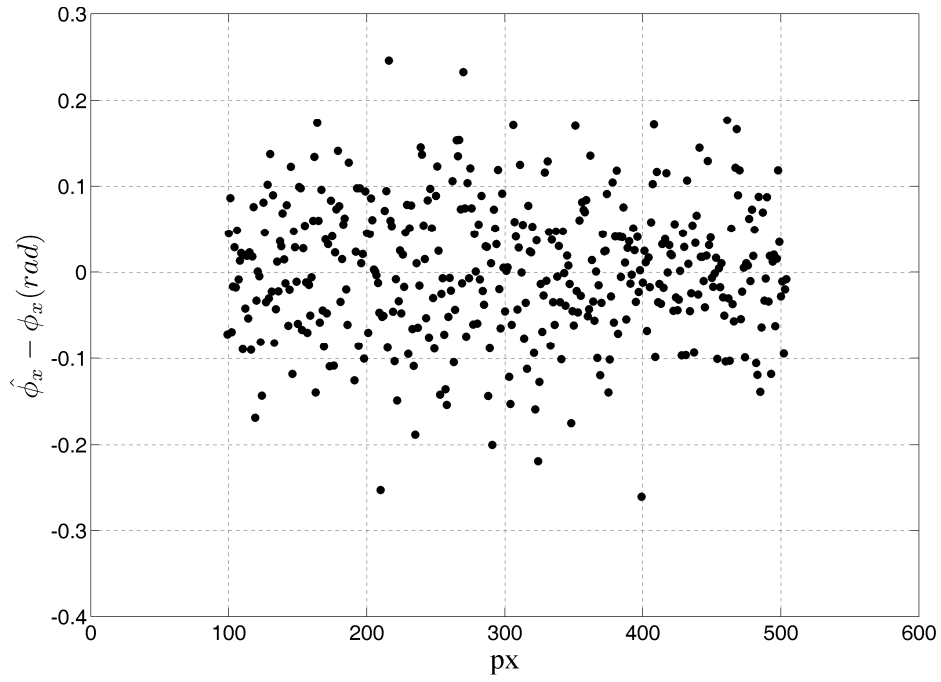


Figura 4.12 Diferencia de las fases absolutas ϕ_x $\hat{\phi}_x$ mostrada en la Figura 4.11

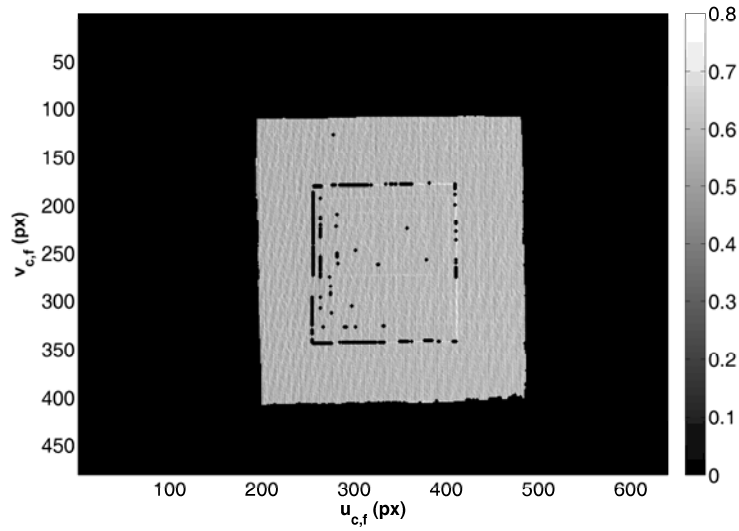


Figura 4.13. Norma del gradiente para Φ_x obtenida mediante la cámara principal

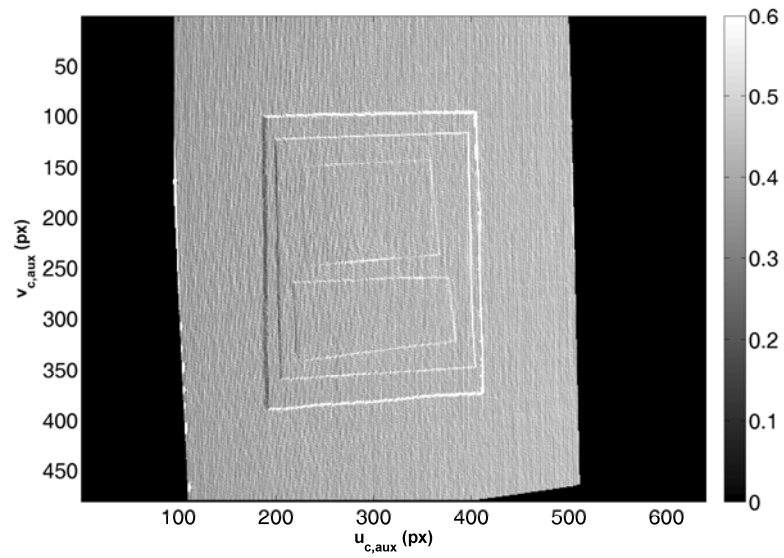


Figura 4.14 Norma del gradiente para ϕ_x mediante la cámara auxiliar

Para mostrar el incremento en la resolución en profundidad, la Figura 4.15 muestra un perfil sobre la fila 200 px (marcada en la Figura 4.10) de la coordenada de profundidad obtenida a partir de la fase absoluta extensa (Φ_x) y precisa ($\hat{\Phi}_x$).

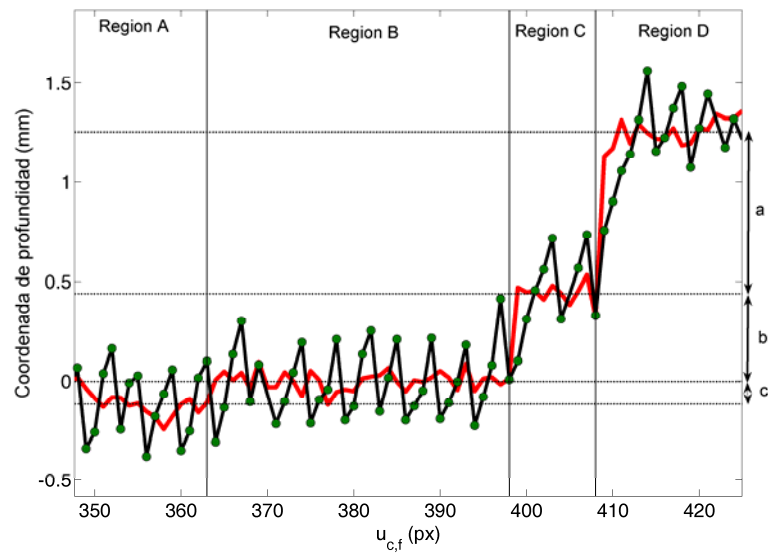


Figura 4.15 Perfil de la coordenada de profundidad a lo largo de la fila 200 px obtenida a partir de la medida extensa (línea negra) y precisa (línea roja).

En la Figura 4.15 se aprecia la diferente resolución en profundidad entre la medida extensa y la precisa. Mientras que en la medida extensa el escalón de 0.5 mm es difícilmente apreciable, en la medida precisa se distingue con claridad incluso el escalón más pequeño de 0.1 mm. Es importante hacer notar que la Figura 4.15 muestra los datos en crudo sin ningún proceso de post-procesado. En esta figura se observa el error cíclico producido por la respuesta no lineal de la cámara y el proyector [Huntley 99][Hibino 95]. Este error cíclico puede ser filtrado de forma directa mediante métodos estándar de promediado como filtrado en el espacio de Fourier.

Los resultados de los distintos escalones obtenidos en el caso preciso y extenso se proporcionan en la Tabla 4.1.

	Medida precisa (mm)	Medida extensa (mm)
a	0.14	0.11
b	0.44	0.46
c	0.81	0.76

Tabla 4.1. Valores de los distintos escalones (a, b y c en la Figura 4.15) obtenidos a partir de la medidas precisa y extensa. Todos los valores están dados en milímetros.

En la Tabla 4.1 se observa la concordancia en los resultados para los distintos escalones entre ambas configuraciones. La Tabla 4.2 muestra los errores en la recuperación de la coordenada de profundidad obtenidos a partir de la desviación estándar de la diferencia, entre los datos contenidos en las Regiones A, B, C y D y los respectivos planos de mejor ajuste en dichas regiones. En la Tabla 4.2 se observa una reducción del error de recuperación de la coordenada de profundidad de un factor 4.

	Precisa (mm)	Extensa (mm)	Extensa / Precisa
Error (Región A)	0.04	0.17	4
Error (Región B)	0.05	0.18	4
Error (Región C)	0.05	0.21	4
Error (Región D)	0.06	0.21	4

Tabla 4.2. Valores de la desviación estándar para la diferencia entre los datos contenidos en las regiones A, B, C y D en la Figura 4.15 y el mejor plano de ajuste en cada una de dichas regiones para los casos extenso y preciso. Los cocientes entre ambas configuraciones se dan adicionalmente. Todos los valores se proporcionan en milímetros.

Para el caso de la pirámide de metal mostrada en la Figura 4.9, la Figura 4.16 muestra un perfil sobre la fila 180 px, mostrada mediante una línea negra discontinua en la Figura 4.9, de la fase auxiliar ϕ_x , de la fase fina ϕ_x y de la fase mejorada $\hat{\phi}_x$.

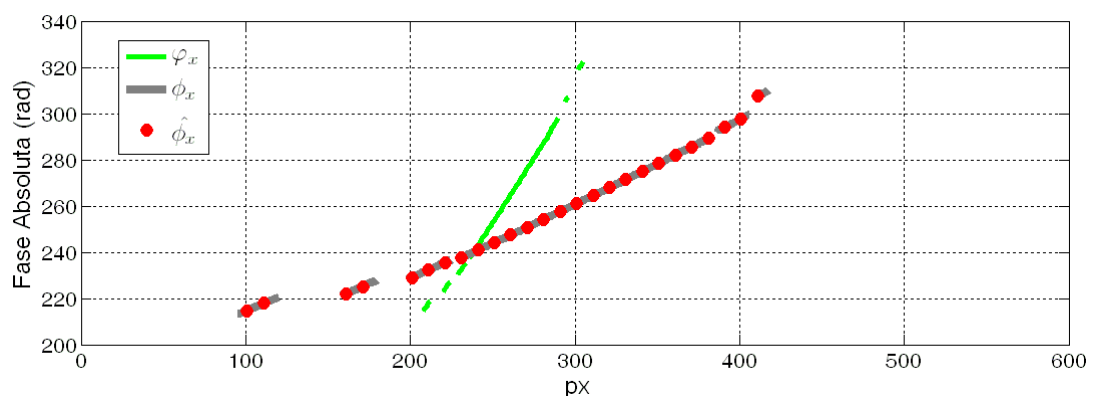


Figura 4.16. Perfil de las fases absolutas ϕ_x , ϕ_x y $\hat{\phi}_x$ para la fila 180 px mostrada en la Figura 4.8 mediante una línea negra discontinua.

De la Figura 4.16 se observa la diferente pendiente existente entre ϕ_x y $\phi_x, \hat{\phi}_x$. Por otra parte también se advierte de la Figura 4.14 la concordancia entre ϕ_x y $\hat{\phi}_x$. Para cuantificar la diferencia entre ϕ_x y $\hat{\phi}_x$ la Figura 4.17 muestra su diferencia a lo largo de la fila 180 px.

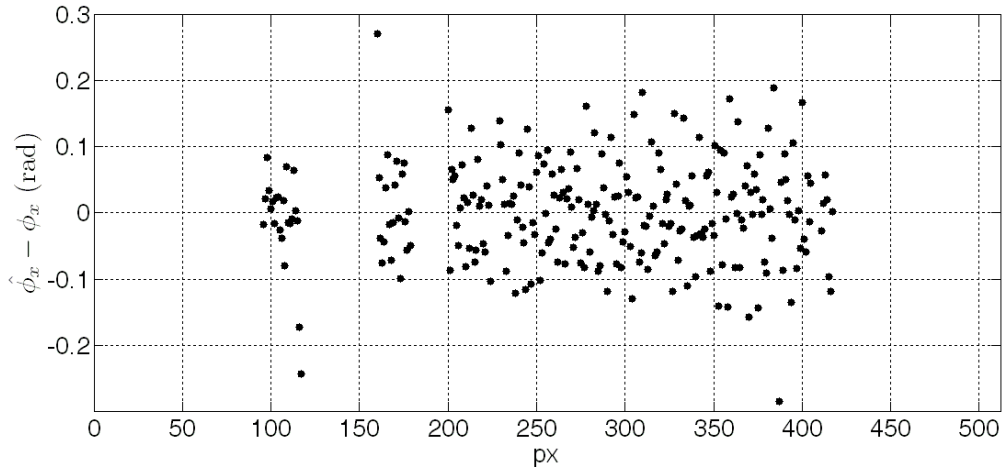


Figura 4.17 Diferencia de las fases absolutas $\phi_x, \hat{\phi}_x$ mostrada en la Figura 4.16

De la Figura 4.17 se observa que los datos son totalmente compatibles con los mostrados en la figura 4.12 para el caso de la pirámide de papel.

Finalmente las Figuras 4.18 y 4.19 muestran un perfil de la coordenada de profundidad. La Figura 4.18 muestra un perfil de toda la fila 180 px mostrada en la Figura 4.8 con una línea negra discontinua. Por otra parte la Figura 4.9 muestra un perfil de una pequeña parte de dicha fila para observar con claridad el escalón de 0.1 mm.

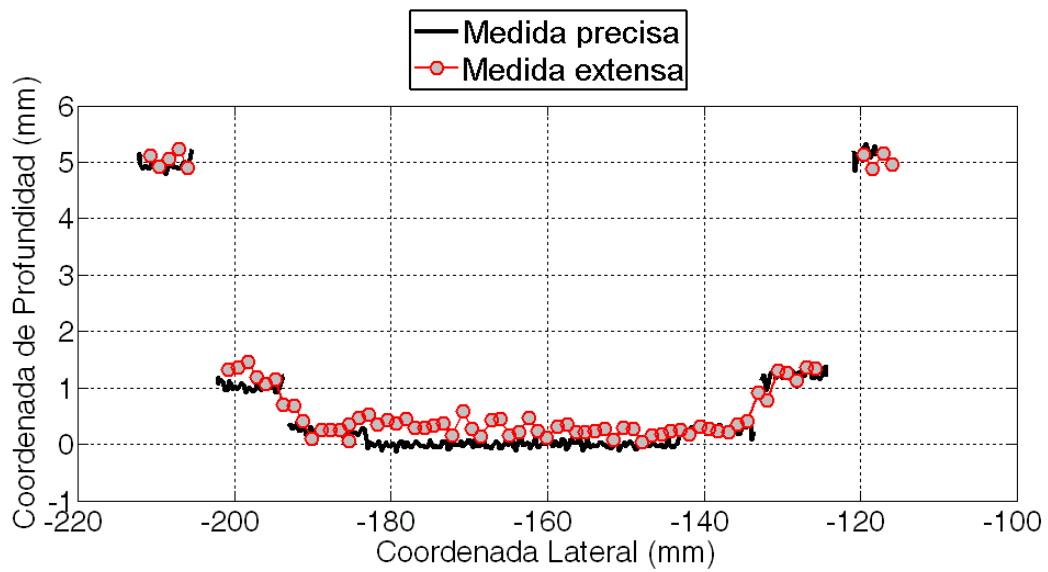


Figura 4.18 Perfil de la coordenada de profundidad a lo largo de la fila 180 px obtenida a partir de la medida extensa (línea roja) y precisa (línea negra).

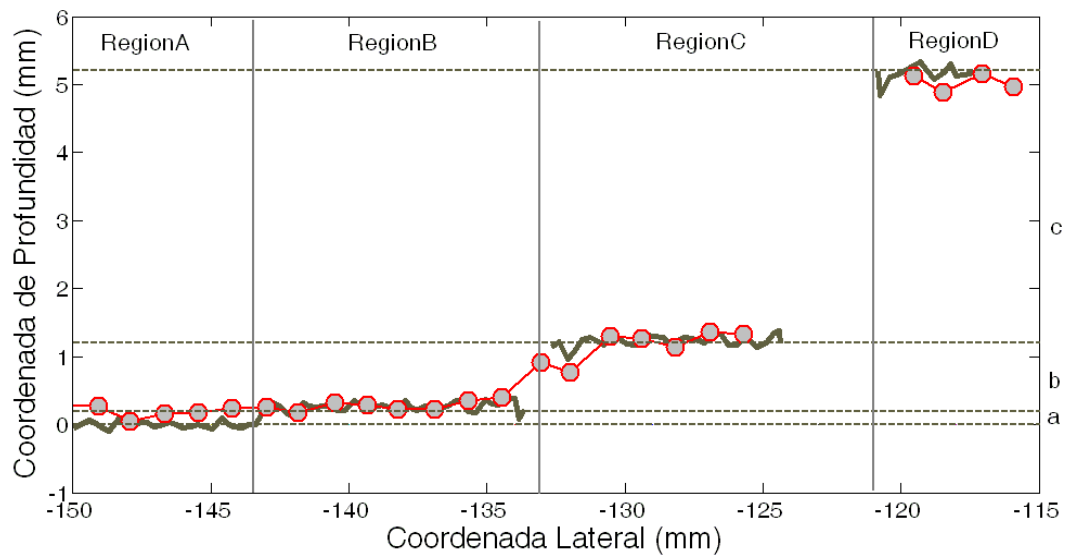


Figura 4.19 Perfil de la coordenada de profundidad a lo largo de parte de la fila 180 px obtenida a partir de la medida extensa (línea roja) y precisa (línea negra).

De las Figuras 4.18 y 4.19 se observa el correcto registro entre las medidas. Por otra parte, de la Figura 4.19 se observa que el escalón mas pequeño de 0.1 mm únicamente es apreciable mediante la medida precisa y no mediante la medida

extensa. Los resultados de los valores de los distintos escalones se proporcionan en la Tabla 4.3

	Medida Precisa (mm)	Medida Extensa (mm)
a	0.18	0.04
b	0.95	1.2
c	4.7	4.5

Tabla 4.3 Valores calculados de los diferentes escalones (a, b y c en la Figura 4.19) obtenidos a partir de la medida precisa y la medida extensa. Todos los valores están dados en milímetros.

4.4 Inspección de defectos en grandes superficies aeronáuticas

Métodos para la inspección de superficies extensas capaces de medir con un pequeño error son necesarios en un amplio abanico de aplicaciones industriales.

Un ejemplo de aplicación es la inspección y caracterización de defectos superficiales en grandes paneles aeronáuticos. En este apartado se muestra la utilización del método local de multiresolución propuesto para la inspección de defectos en grandes paneles aeronáuticos.

La Figura 4.20 muestra una imagen del panel aeronáutico sobre el que se va a aplicar la técnica propuesta para su caracterización. Este panel, tiene unas dimensiones de $500 \times 300 \text{ mm}^2$ y tiene dos indentaciones de aproximadamente $50 \mu\text{m}$.



Figura 4.20 Panel aeronáutico en el que se va a aplicar el método local de multiresolución propuesto para inspeccionar y caracterizar los defectos sobre su superficie.

Las Figuras 4.21 y 4.22 muestran los mapas obtenidos de la coordenada de profundidad en la configuración precisa y extensa respectivamente para la superficie aeronáutica mostrada en la Figura 4.20. La región oscura que se observa corresponde a un pedazo de papel de aproximadamente 0.1 mm de grosor pegado sobre la plancha para localizar los defectos. Por otra parte, los defectos corresponden a las áreas blancas. Las Figuras 4.21 y 4.22 muestran el incremento de resolución en profundidad entre las dos configuraciones. Obsérvese que en la Figura 4.21 solo se muestra el área de interés en la que se observan los defectos. Esta es la razón por la que el tamaño en píxeles de la Figura 4.21 es menor que el tamaño de la Figura 4.22.

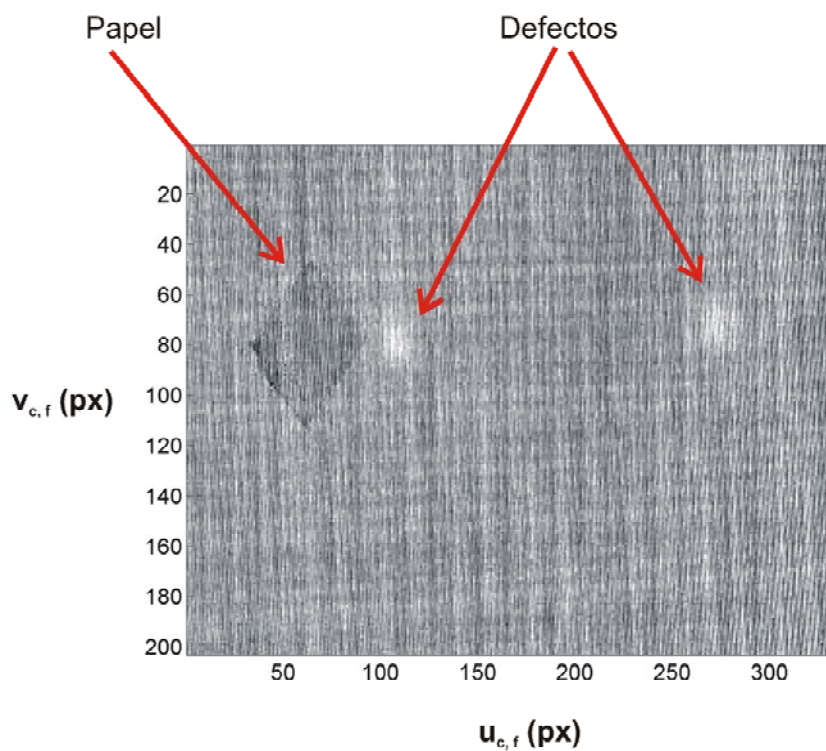


Figura 4.21 Mapa de la coordenada de profundidad obtenida mediante la medida extensa

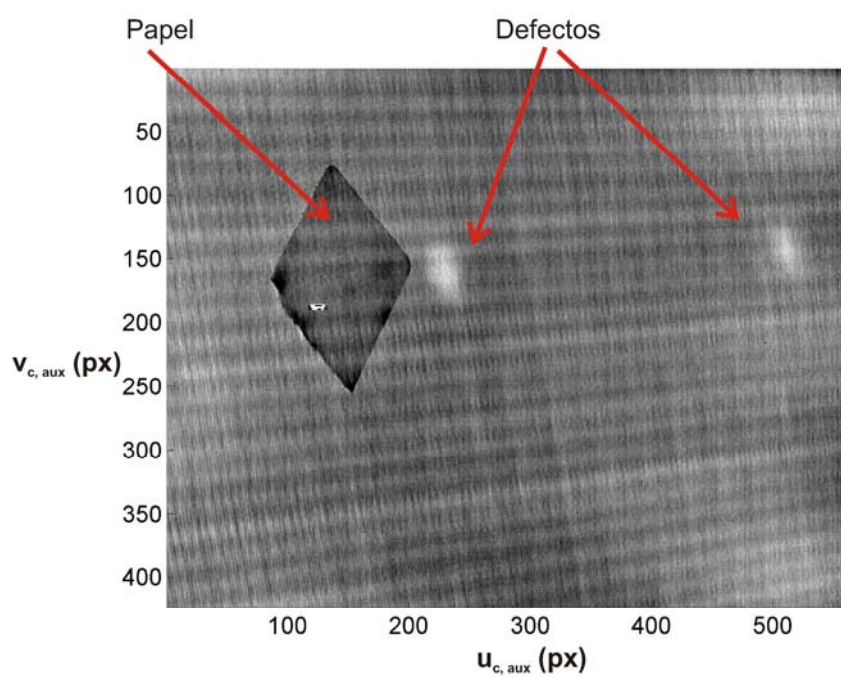


Figura 4.22 Mapa de la coordenada de profundidad obtenida mediante la medida precisa

Las Figuras 4.23y 4.24 muestran perfiles a través de la fila 175 px sobre las Figuras 4.21 y 4.22. En la Figura 4.23 se observa el pedazo de papel de 0.1 mm y uno de los defectos. En la Figura 4.24 se muestra con detalle dicho defecto.

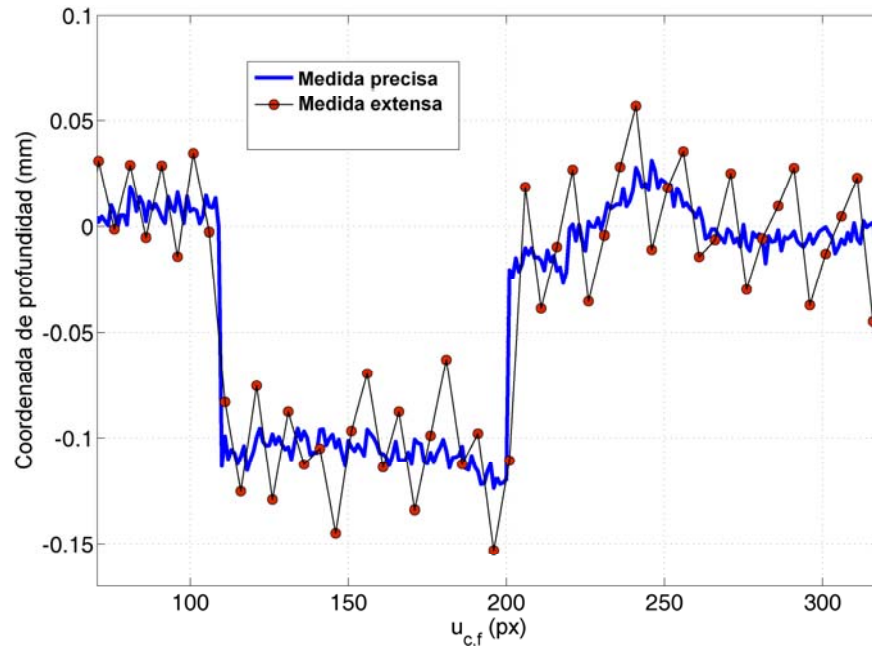


Figura 4.23 Perfil de la coordenada de profundidad a través de la fila 175 px de la Figura 4.21 y 4.22

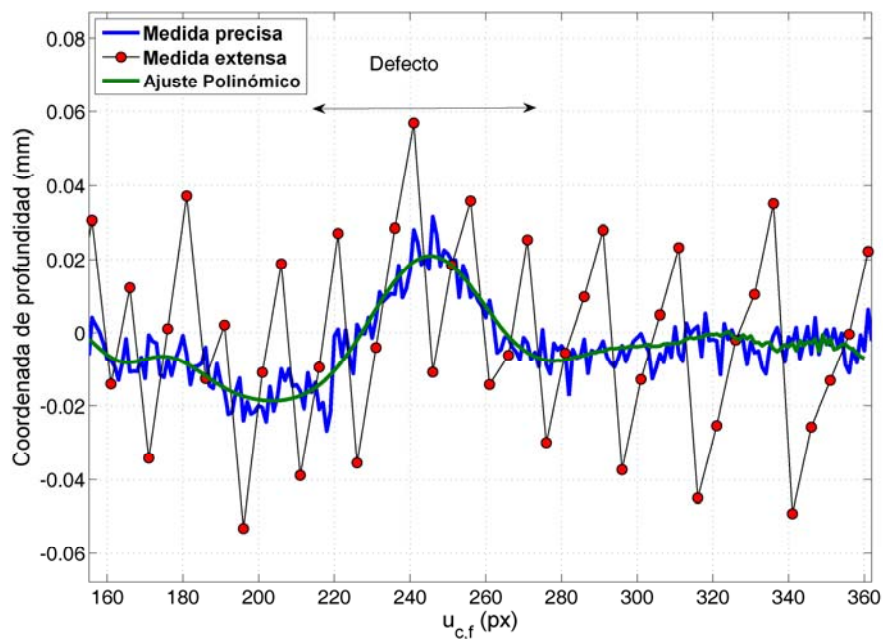


Figura 4.24 Perfil de la coordenada de profundidad de uno de los defectos mostrado en las Figuras 4.21 y 4.22

En la Figura 4.23 se observa con claridad el escalón de 0.1mm debido al papel situado entre los píxeles 110 y 200. Por otra parte el defecto se puede apreciar entre los píxeles 220 y 290. Para observar con claridad el defecto, se ha eliminando el escalón debido al papel añadiendo 0.1 mm en la coordenada de profundidad para los píxeles comprendidos entre 110 y 200. La Figura 4.24 muestra el perfil con el escalón debido al papel corregido. Esta Figura muestra adicionalmente un ajuste polinómico del defecto obtenido mediante la medida precisa. Usando este ajuste polinómico se ha estimado el error en la recuperación de la coordenada de profundidad como la desviación estándar de la diferencia entre el ajuste polinómico y las medidas precisa y extensa. La Tabla 4.4 se muestran los resultados obtenidos.

Error (medida precisa) (mm)	0.004
Error (medida extensa) (mm)	0.03
Error extensa / Error precisa	7

Tabla 4.4 Desviación estándar de la diferencia entre el ajuste polinómico y las medidas precisa y extensa para el panel aeronáutico mostrado en la Figura 4.20. Se proporciona adicionalmente el cociente entre el valor obtenido para la medida extensa y precisa.

De la Tabla 4.4 puede observarse una reducción de un factor 7 en la recuperación de la coordenada de profundidad entre la configuración extensa y precisa.

Finalmente la Figura 4.25 muestra una vista de la medidas 3D (extensa y precisa) obtenidas de la plancha aeronáutica. De la Figura 4.25 se observa que las medidas solapan perfectamente. Por otra parte es importante observar la diferente extensión de las medidas. Se observa que la medida extensa engloba un área mucho más extenso que la medida precisa. Por otro lado de la Figura 4.25 se observa la diferente resolución entre las medidas, donde se observa que la medida precisa posee una resolución mayor.

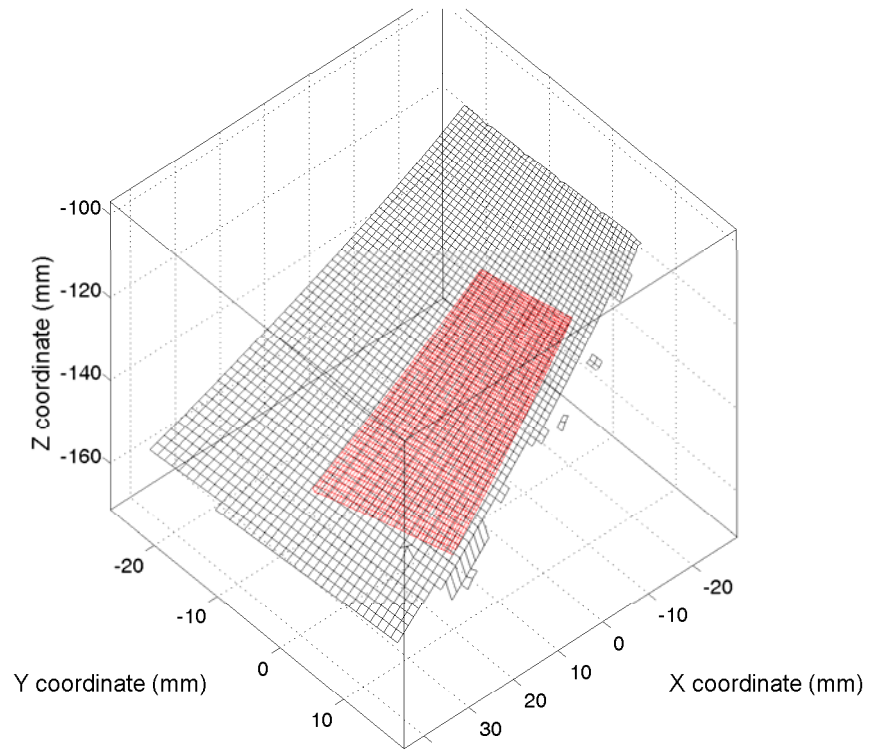


Figura 4.25 Vista de las medidas 3D obtenidas mediante la configuración precisa y extensa proyectar de la plancha aeronáutica

Obsérvese que el método de multiresolución propuesto necesita cinco medidas de fase —dos medidas de fase extensas, dos medidas de fase auxiliares y una medida de fase precisa— dos búsquedas de correspondencias, un conjunto de ajustes locales a un plano, para la diferencia entre las medidas de fase precisa y auxiliar y finalmente un proceso de triangulación. Todas estas operaciones son lineales y por tanto poseen un tiempo constante de procesamiento. Este incremento de complejidad está justificado por la capacidad de realizar medidas en diferentes escalas de resolución, de esta forma este método es capaz de obtener resultados satisfactorios en situaciones en las que un sistema de triangulación convencional no es capaz.

4.5 Conclusiones

En este Capítulo se ha presentado un método de multiresolución que permite obtener una medida 3D de un objeto extenso con alta resolución en profundidad.

El método propuesto no requiere el uso de optimizaciones no lineales así como de procesos de recalibración o registro de vistas. De esta forma, el método propuesto es muy flexible y rápido.

La validez de esta técnica ha sido probada usando dos objetos de prueba y un panel aeronáutico. Los resultados experimentales muestran un decrecimiento de aproximadamente un orden de magnitud en los errores de recuperación de la coordenada de profundidad.

El trabajo presentado en este capítulo ha dado lugar a dos publicaciones, una referenciada [Vargas 08] y otra sin referenciar [VQ 08]

Capítulo 5

Método global de multiresolución

“Experiencia es el nombre que damos a nuestras equivocaciones”

Oscar Wilde

“En los momentos de crisis, solo la imaginación es más importante que el conocimiento”

Albert Einstein

En el Capítulo 4 se ha mostrado una técnica de multiresolución mediante la cual es posible superar la limitación resolución-campo típica en los sistemas de triangulación activa con geometría fija. Esta limitación determina una relación constante entre el área observada y la resolución en profundidad obtenida, que solo depende de la configuración del sistema de medida.

La técnica de multiresolución presentada en este capítulo está basada en un sistema previamente calibrado formado por una cámara y un proyector. El método consiste en cambiar los parámetros del sistema con la finalidad de incrementar su sensibilidad en profundidad. Este método no requiere que el objeto a medir sea localmente plano y la recalibración del sistema se realiza de forma global y no local, por lo que introducen importantes mejoras respecto al método presentado en el Capítulo 4. El trabajo mostrado en este capítulo ha dado lugar a una publicación referenciada [Vargas 09]

5.1 Introducción

En el Capítulo 4 se ha presentado la limitación *resolución-campo* que presentan los sistemas de triangulación activa. Esta limitación establece una relación fija entre el error de la coordenada de profundidad y la extensión lateral medida y que solo depende de la configuración del sistema (parámetros intrínsecos e extrínsecos de la cámara y el proyector). Adicionalmente, se ha proporcionado

una visión del estado del arte de las técnicas de multiresolución existentes [Andrá 97][Kayser 99][Osten 99][Wiora 00][SHNR 01][Notni 01][Kayser 04]. Finalmente, en dicho capítulo se ha proporcionado un método de multiresolución local que permite obtener medidas 3D de objetos extensos con alta resolución en profundidad. No obstante, la técnica presenta limitaciones prácticas como la necesidad de que el objeto a medir sea localmente plano o que el cálculo de la fase mejorada ($\hat{\phi}_x$) se obtiene localmente utilizando pequeñas vecindades de típicamente 5×5 píxeles y no de forma global.

En este capítulo se presenta un método de multiresolución global basado en la obtención de las matrices de proyección para recalibrar dinámicamente un sistema de triangulación activa adaptativo. El problema de recalibrar un sistema adaptativo ha sido ampliamente estudiado recientemente [Schreiber 00][Chen 02][Lie 03][Vargas 08]. Obsérvese que dentro de la triangulación activa los términos recalibración y autocalibración se usan sin distinción. En [Schreiber 00] se usa un método de autocalibración para obtener una medida de 360° del objeto. En este caso, el método de autocalibración está basado en el uso de la fase absoluta entre distintas vistas para calcular las distintas orientaciones entre proyectores. En [Chen 02][Lie 03] se presenta un método para la recalibración dinámica de un sistema de triangulación activa cuando se modifica la posición relativa entre la cámara y el proyector. En este caso, no se modifican los parámetros intrínsecos de la cámara ni del proyector. Los nuevos parámetros extrínsecos se obtienen mediante el uso de indicadores o *cues*, como el indicador geométrico o el de foco. Además de estos indicadores, en los trabajos [Chen 02][Lie 03] se impone para la cámara un movimiento dentro de un plano para poder realizar la autocalibración. Estos indicadores reducen el grado de libertad de los nuevos parámetros extrínsecos pero son difíciles de medir.

El método de multiresolución presentado en este capítulo se basa en autocalibrar dinámicamente el sistema de triangulación activa. El procedimiento de autocalibración no requiere el uso de ningún indicador. Partiendo de una calibración previa, el sistema de triangulación puede ser recalibrado tantas veces como se desee al modificar el sistema de triangulación activa (modificando los parámetros intrínsecos y/o extrínsecos de la cámara ó el proyector).

El presente capítulo está organizado en tres partes, en el apartado 5.2 se da el fundamento teórico, en el apartado 5.3 se proporcionan los resultados experimentales que muestran la validez del método y finalmente en el apartado 5.4 se muestran las conclusiones.

5.2 Fundamento Teórico

En este apartado se va a exponer el fundamento teórico así como el proceso de medida del método propuesto. En los apartados 5.2.1, 5.2.2 y 5.2.3 se introduce la formulación matemática que explica el procedimiento de recalibración dinámica para un sistema de triangulación activa y que es la base del método de multiresolución. En el apartado 5.2.4 se explica la técnica de multiresolución propuesta. Finalmente en el apartado 5.2.5 se explican las diferentes configuraciones degeneradas que existen, para las que no es posible recalibrar el sistema de medida.

5.2.1 Autocalibración mediante la matriz de proyección

Como ya se estableció en el apartado 2.2 del Capítulo 2, el proceso de formación de imagen de un punto 3D en el plano retinal de la cámara y del proyector puede ser modelado mediante,

$$sm_c = P_c M_w \quad (5.1)$$

y,

$$sm_p = P_p M_w \quad (5.2)$$

donde, $M_w = [X_w, Y_w, Z_w, 1]^T$ es un punto 3D en coordenadas homogéneas y referido respecto al sistema de referencia del mundo (véase la Figura 2.8), P_c y P_p son matrices 4×3 que corresponden a las matrices de proyección de la cámara y del proyector respectivamente, $m_c = [u_c, v_c, 1]^T$ y $m_p = [u_p, v_p, 1]^T$ son las

coordenadas homogéneas correspondientes a M_w en el plano retinal de la cámara y del proyector respectivamente. Finalmente, s es un factor de escala arbitrario.

Estas matrices de proyección están formadas por los parámetros intrínsecos y extrínsecos, definidos en el Capítulo 2. Como ya se vio en el apartado 2.2 expandiendo las expresiones (5.1) y (5.2),

$$sm_C = K_C [R_C | \mathbf{t}_C] M_w \quad (5.3)$$

y,

$$sm_P = K_P [R_P | \mathbf{t}_P] M_w \quad (5.4)$$

donde, K_C y K_P son las matrices de parámetros intrínsecos de la cámara y del proyector respectivamente y $[R_C | \mathbf{t}_C]$ y $[R_P | \mathbf{t}_P]$ son los parámetros extrínsecos de cámara y del proyector formados por dos matrices 3×4 constituidas por una matriz de rotación (3×3) y un vector de traslación (3×1). Finalmente s es un factor de escala arbitrario que en general es diferente para la expresión (5.3) y (5.4).

Después de calibrar el sistema de triangulación activa, obteniéndose los parámetros intrínsecos (K_C , K_P) y extrínsecos ($[R_C | \mathbf{t}_C]$, $[R_P | \mathbf{t}_P]$) de la cámara y el proyector, es posible realizar una medida 3D como se mostró en el apartado 2.4. Obsérvese que tras la calibración del sistema si alguno de los parámetros intrínsecos o extrínsecos se modifica, la matriz de proyección correspondiente también se modificará de la forma, $P_k \rightarrow P'_k$ con k igual a C o P , y por tanto será necesario recalibrar el sistema.

El método de multiresolución propuesto está basado en un método de autocalibración que permite recalibrar el sistema cuando la cámara o el proyector cambian sus parámetros intrínsecos y/o extrínsecos. Son posibles dos configuraciones. En el Caso 1 la cámara permanece quieta y se modifican los parámetros intrínsecos y/o extrínsecos del proyector. En el Caso 2 la cámara se

modifica y el proyector permanece inalterado. El caso en el que tanto la cámara como el proyector se modifican no está permitido por nuestro método de autocalibración.

5.2.2 Caso 1: Autocalibración al modificar el proyector

En este caso, la cámara no se modifica mientras que se varían los parámetros intrínsecos y extrínsecos del proyector. Un esquema del proceso se muestra en la Figura 5.1.

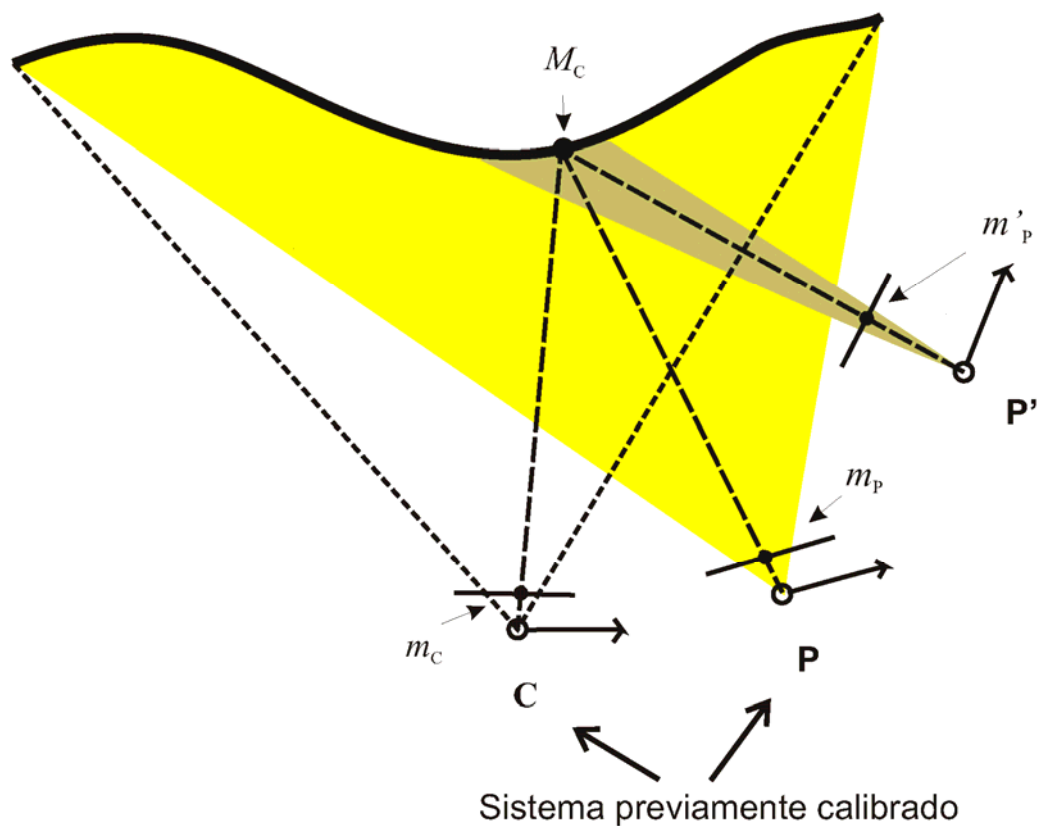


Figura 5.1 Esquema del proceso de autocalibración al modificar el proyector donde C denota a la cámara, P al proyector y P' es el proyector después de haber modificado sus parámetros intrínsecos y extrínsecos. M_C es un punto arbitrario y m_P , m_C y m'_P corresponden a su proyección en los planos retinales de el proyector (P), cámara (C) y proyector (P')

Partiendo de una configuración previamente calibrada, mostrada en la Figura 5.1 como C - P , el proyector cambia a una nueva configuración P' . Si el objeto a medir no cambia, es posible recalibrar P' con una medida 3D previa obtenida mediante

C-P. Las coordenadas 3D de un punto sobre el objeto $M_C = [X_C, Y_C, Z_C, 1]^T$, referidas en el sistema de referencia de la cámara, no varían porque ni la cámara y ni el objeto cambian en todo en todo el proceso de autocalibración.

Obsérvese que las coordenadas 3D sobre el objeto, $M_C = [X_C, Y_C, Z_C, 1]^T$ han sido previamente obtenidas mediante el sistema calibrado **C-P** con la técnica habitual de proyección de una fase absoluta mediante el método GC + PS (véase el Capítulo 2). Tras modificar el proyector a la nueva configuración **P'**, se computan para cada píxel de la cámara m_C dos nuevas fases absolutas $[\Phi'_x(m_C), \Phi'_y(m_C)]$ mediante la técnica GC + PS. Mediante estas nuevas fases se obtienen las coordenadas correspondientes en el plano retinal del proyector $m'_p(m_C)$ usando la expresión (2.18), $m'_p(m_C) = \left(\frac{\Phi'_x(m_C)T_x}{2\pi}, \frac{\Phi'_y(m_C)T_y}{2\pi}, 1 \right)$. Nótese que en este caso, las coordenadas de la cámara $m_C = [u_C, v_C, 1]$ son coordenadas en píxeles y por tanto valores enteros. No obstante, las coordenadas correspondientes del proyector $m'_p(m_C) = [u'_p(m_C), v'_p(m_C), 1]$ han sido obtenidas a partir de la expresión (2.18) en cada píxel de la cámara y por tanto no son en general valores enteros. Mediante las correspondencias $[m_C, m'_p]$ y la medida 3D previa del objeto, M_C , es posible recalibrar el proyector en su nueva configuración como se va a mostrar.

En el caso de se use el sistema de referencia de la cámara en vez de un sistema genérico de referencia del mundo. De esta forma las expresiones (5.3) y (5.4) se reescriben como,

$$\begin{aligned} sm_C &= K_C [I \mid \mathbf{0}] M_C(m_C) \\ sm_P &= K_P [R \mid \mathbf{t}] M_C(m_C) \end{aligned} \quad (5.5)$$

donde, I y $\mathbf{0}$ son respectivamente la matriz identidad 3×3 y el vector nulo 3×1 . Por otra parte, R y \mathbf{t} corresponden a la matriz de rotación 3×3 y el vector de traslación 3×1 que relacionan los sistemas de referencia de la cámara y del

proyector respectivamente. Si el proyector se modifica y el objeto a medir no cambia tenemos que en la nueva configuración del proyector,

$$sm'_p = P'_p M_C(m_C) = K'_p [R' | \mathbf{t}'] M_C(m_C) \quad (5.6)$$

Despejando y sustituyendo factor de escala, como se realizó en la expresión (2.21)

$$\begin{pmatrix} u'_p P'^3_p - P'^1_p \\ v'_p P'^3_p - P'^2_p \end{pmatrix} M_C = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

Expandiendo (5.7) tenemos,

$$\begin{pmatrix} u'_p X_C & -X_C & u'_p Y_C & -Y_C & u'_p Z_C & -Z_C & u'_p & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v'_p X_C & 0 & v'_p Y_C & 0 & v'_p Z_C & 0 & v'_p & 0 & -X_C & -Y_C & -Z_C & -1 \end{pmatrix} S_p = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

con, $S_p = [P'_{p,31}, P'_{p,11}, P'_{p,32}, P'_{p,12}, P'_{p,33}, P'_{p,13}, P'_{p,34}, P'_{p,14}, P'_{p,21}, P'_{p,22}, P'_{p,23}, P'_{p,24}]$

donde $P'_{p,i,j}$ corresponde a la i -ésima fila y j -ésima columna de la matriz de proyección en la nueva configuración.

Como se observa de (5.8) cada punto 3D proporciona dos ecuaciones linealmente independientes. Una imagen típica obtenida con una cámara CCD suele contener al menos 640×480 píxeles. Es posible apilar todas las ecuaciones correspondientes a (5.8) para todos los píxeles en una única matriz sobredimensionada de típicamente $2 \times 640 \times 480$ filas y 12 columnas. Este sistema sobredimensionado es posible resolverlo mediante una descomposición en valores singulares (SVD) [HZ 00]. De esta forma se computa la nueva matriz de proyección del proyector P'_p . Una vez que se ha obtenido P'_p , se obtienen los nuevos parámetros intrínsecos y extrínsecos del proyector $(K'_p, R'_p, \mathbf{t}'_p)$ mediante una descomposición RQ [HZ 00]. La factorización RQ de una matriz es una

descomposición de la misma, como producto de una matriz triangular superior (R) y una ortogonal (Q). La expresión (5.6) se puede reescribir de la forma,

$$sm'_p = P'_p M_c(m_c) = [K'_p R' \mid K'_p \mathbf{t}'] M_c(m_c) \quad (5.9)$$

Por lo tanto, las tres primeras columnas de P'_p corresponden al producto entre una matriz triangular superior (K'_p) y una matriz ortogonal (R'), que pueden ser obtenidas por tanto a partir de una descomposición RQ . El vector traslación \mathbf{t}' se calcula a partir de la última columna de P'_p y K'_p , obtenido previamente.

Esta primera estimación de los parámetros del proyector se refina mediante una optimización no-lineal. En el proceso de optimización se obtienen los parámetros de distorsión radial y tangencial que son introducidos inicialmente como cero. En el proceso de optimización no-lineal se utiliza el algoritmo de Levenberg-Marquardt [More 77], y se minimiza el error de retroproyección a través de un proceso iterativo en el que se minimiza el error de retroproyección [HZ 00] (véase el apartado 2.3.2 para una explicación del error de retroproyección).

5.2.3 Caso 2: Autocalibración al modificar la cámara

En este caso, el proyector no se modifica mientras que se varían los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara. Un esquema del proceso se muestra en la Figura 5.2. Partiendo de una configuración previamente calibrada, $\mathbf{C-P}$, la cámara cambia a una nueva configuración denotada como $\mathbf{C'}$. Si el objeto a medir no cambia, es posible recalibrar $\mathbf{C'}$ con una medida 3D previa obtenida mediante $\mathbf{C-P}$. El punto 3D correspondiente a m_c y m_p , $M_c(m_c)$ es referido en el sistema de referencia del proyector como $M_p(m_c) = [R \mid \mathbf{t}] M_c(m_c)$.

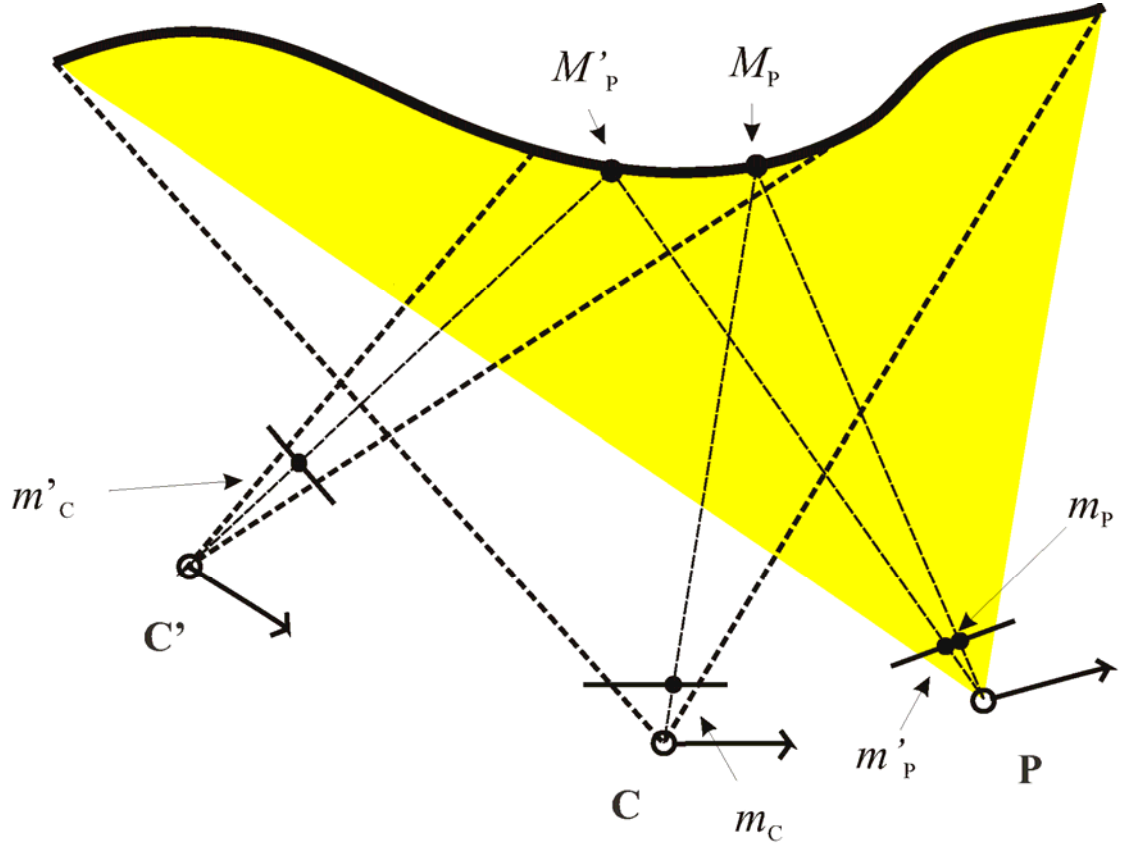


Figura 5.2 Esquema del proceso de recalibración al modificar la cámara donde C denota a la cámara, P al proyector y C' es la cámara después de haber modificado sus parámetros intrínsecos y extrínsecos. M_P es un punto arbitrario observado por m_P y m_C . M'_P es otro punto arbitrario observado por m'_C y m'_P

En este caso, el proceso de recalibración del sistema 3D es ligeramente más complejo que en la sección 5.2.2 debido a que el proyector no forma imagen del objeto. En la nueva configuración C' - P se computa para cada píxel de la cámara m'_C una nueva medida de fase absoluta $[\Phi'_x(m'_C), \Phi'_y(m'_C)]$ mediante la técnica GC + PS. En este caso las nuevas fases absolutas obtenidas se denotan aquí como $[\Phi'_x, \Phi'_y]$ para indicar que corresponden a una nueva medida de la fase. Las coordenadas en el plano retinal de proyector correspondientes a m'_C son $m'_P(m'_C)$ y se obtienen a partir de la expresión (2.18) como $m'_P(m'_C) = \left(\frac{\Phi'_x(m'_C)T_x}{2\pi}, \frac{\Phi'_y(m'_C)T_y}{2\pi}, 1 \right)$. En este caso, como ya se explico en la sección 5.2.2 $m'_C = [u'_C, v'_C, 1]$ son coordenadas en píxeles y por tanto valores

enteros. No obstante las coordenadas correspondientes del proyector $m'_p(m'_c) = [u'_p(m'_c), v'_p(m'_c), 1]$ se han computado a partir de la expresión (2.18) y no son en general valores enteros. Obsérvese que se tiene que $[\Phi'_x(m'_c), \Phi'_y(m'_c)] = [\Phi'_x(m'_p), \Phi'_y(m'_p)]$ debido a que m'_c y m'_p son puntos correspondientes. El punto 3D en el que se cortan las líneas de vista que pasan por m'_c y m'_p , $M'_p(m'_c) = M'_p(m'_p) = M'_p$, no se conoce a priori pero debido a que ni el objeto ni el proyector se han modificado es posible utilizar el valor de la fase absoluta como marcas sobre el objeto para obtener $M'_p(m'_c)$ mediante $M_p(m_c)$. Para calcular $M'_p(m'_c)$, es posible interpolar los valores de $[m_p(m_c), M_p(m_c)]$ en los nuevos puntos $m'_p(m'_c)$. Obsérvese que es absolutamente equivalente hablar en términos de fase absoluta o coordenadas del proyector debido a que estas magnitudes están ligadas a partir de la expresión (2.18). Dicha interpolación se efectúa para cada componente de M_p (X_p, Y_p y Z_p). Una vez que se han obtenido m'_c , $m'_p(m'_c)$ y $M'_p(m'_c) = M'_p(m'_p) = M'_p$ es posible recalibrar los nuevos parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara como se va a mostrar.

Las expresiones (5.3) y (5.4) se reescriben en el caso de usar el sistema de referencia del proyector,

$$\begin{aligned} sm_c &= K_c [R | \mathbf{t}]^{-1} M_p(m_c) \\ sm_p &= K_p [I | \mathbf{0}] M_p(m_c) \end{aligned} \quad (5.10)$$

donde R y \mathbf{t} son como en (5.5) las matriz de rotación y el vector de traslación que relacionan los sistemas de referencia de la cámara y el proyector. En el caso de que se modifique la cámara sin que haya ninguna modificación en el objeto a medir,

$$sm'_c = K'_c [R' | \mathbf{t}']^{-1} M'_p(m'_c) \quad (5.11)$$

donde, como ya se mencionó previamente $M'_p(m'_c)$ se obtiene a partir de $M_p(m_c)$ mediante interpolación. Si se resuelve el factor de escala como se hizo en (2.21) se obtiene,

$$\begin{pmatrix} u'_C P'_C{}^3 - P'_C{}^1 \\ v'_C P'_C{}^3 - P'_C{}^2 \end{pmatrix} M'_P(m'_C) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.12)$$

Expandiendo (5.12)

$$\begin{pmatrix} u'_C X'_P & -X'_P & u'_C Y'_P & -Y'_P & u'_C Z'_P & -Z'_P & u'_C & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v'_C X'_P & 0 & v'_C Y'_P & 0 & v'_C Z'_P & 0 & v'_C & 0 & -X'_P & -Y'_P & -Z'_P & -1 \end{pmatrix} S_C = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.13)$$

con, $S_C = [P'_{C,31}, P'_{C,11}, P'_{C,32}, P'_{C,12}, P'_{C,33}, P'_{C,13}, P'_{C,34}, P'_{C,14}, P'_{C,21}, P'_{C,22}, P'_{C,23}, P'_{C,24}]$, donde $P'_{C,ij}$ corresponde a la i -ésima fila y j -ésima columna de la matriz de proyección de la cámara en la nueva configuración. A partir de (5.13) se resuelve S_C mediante descomposición en valores singulares y se obtiene K'_C, R'_C, t'_C mediante una descomposición RQ como se explico en el apartado anterior (apartado 5.2.3). Finalmente se realiza una optimización no-lineal de K'_C, R'_C, t'_C mediante el algoritmo Levenberg-Marquardt [More 77].y se minimiza el error de retroproyección usando como primera estimación el valor previamente calculado. En esta optimización se obtienen los valores de distorsión radial y tangencial más óptimos.

5.2.4 Método de multiresolución

El método de multiresolución se basa en cambiar dinámicamente el sistema de triangulación con la finalidad de adaptar su sensibilidad en profundidad al detalle que se quiere inspeccionar. Como se explico previamente en el Capítulo 4, en un sistema de triangulación activa existe un compromiso entre el tamaño de la región que se quiere inspeccionar y la sensibilidad en profundidad. De esta forma, si se quiere incrementar la resolución en profundidad es necesario modificar la geometría del sistema. La técnica de multiresolución propuesta consiste en obtener inicialmente una medida 3D de toda la superficie mediante un sistema previamente calibrado. Seguidamente la cámara o el proyector se modifican

cambiando sus parámetros intrínsecos y/o extrínsecos. En el caso de que la cámara cambie el proyector no puede ser modificado y viceversa. Durante todo el proceso de multiresolución el objeto a medir tiene que permanecer estático, sin que se puede realizar ninguna modificación sobre el. Mediante el sistema de recalibración explicado en los apartados 5.2.2 y 5.2.3 se recalibra la cámara o el proyector. Este proceso se puede repetir tantas veces como sea necesario para obtener la sensibilidad en profundidad necesaria para inspeccionar el detalle deseado.

5.2.5 Configuraciones degeneradas

En los apartados 5.2.2 y 5.2.3 se ha mostrado que a partir de un punto 3D y su proyección en el plano retinal de la cámara (m_c) o del proyector (m_p) es posible obtener dos ecuaciones linealmente independientes, que ligán dichos puntos con los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara o proyector (véase las expresiones 5.8 y 5.12). Una matriz de proyección genérica posee 10 grados de libertad (f^x, f^y, c^x, c^y , tres ángulos de rotación y tres componentes del vector de traslación), por lo que es necesario al menos cinco puntos 3D y sus proyecciones para calcular dicha matriz.

El problema de obtener la matriz de proyección que relaciona un conjunto de puntos 3D con sus proyecciones en una cámara, se conoce en la literatura como *camera resectioning* [HZ 00] o calibración. Como se muestra en [HZ 00] existen ciertas configuraciones críticas para las cuales no es posible obtener una matriz de proyección única mediante una sola vista, independientemente del número de puntos 3D. En un proceso real de calibración a partir de una vista es improbable encontrar estas configuraciones críticas con excepción de la configuración crítica de plano. En este caso, todos los puntos 3D son coplanares y no se puede obtener una matriz de proyección única que modele el proceso de formación de imagen. De todas las matrices de proyección posibles una de ellas corresponde a la que está formada por los parámetros intrínsecos y extrínsecos reales de la cámara o proyector. Por lo tanto, en el caso de que se desee medir un

plano, con todos los puntos 3D coplanares, no es posible usar el método de recalibración propuesto.

5.3 Resultados Experimentales

El sistema de triangulación activa se ha formado por una cámara *firewire* del resolución 1024×768 píxeles con óptica motorizada e integrada y un proyector Benq PE7700 cuya óptica ha sido modificada como se explica en el Apéndice II. El sistema de triangulación se ha calibrado mediante un método basado en modelo [Zhang 99][Zhang 00].

Para probar la validez del método de multiresolución propuesto, este se ha probado primero con una simulación y finalmente con un objeto calibrado, que consiste en una pirámide metálica mecanizada. La simulación se ha realizado con los datos usados por Heikkilä en su trabajo [Heikkilä 00] para demostrar la validez de su método de calibración. Estos datos provienen de una cámara real y están compuestos por 491 puntos 3D y sus proyecciones en el plano retinal de una cámara real. Mediante estos datos y las expresiones (5.8) y (5.12) se computan los vectores S_p o S_c para obtener los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara. Finalmente estos parámetros de calibración son refinados mediante una optimización no-lineal usando el algoritmo de Levenberg-Marquardt [More 77].y donde se minimiza el error de retroproyección a través de un proceso iterativo [HZ 00].

.Una vez obtenidos estos parámetros de calibración se comparan con los valores calculados mediante un método estándar de calibración [Zhang 99][Zhang 00]. La Figura 5.8 muestra los puntos 3D proporcionados por Heikkilä en [Heikkilä 00]. Obsérvese que en la Figura 5.8 hay 491 puntos 3D distribuidos en dos planos con un ángulo de 90° entre ellos. La distancia entre dos puntos 3D vecinos es de 15mm.

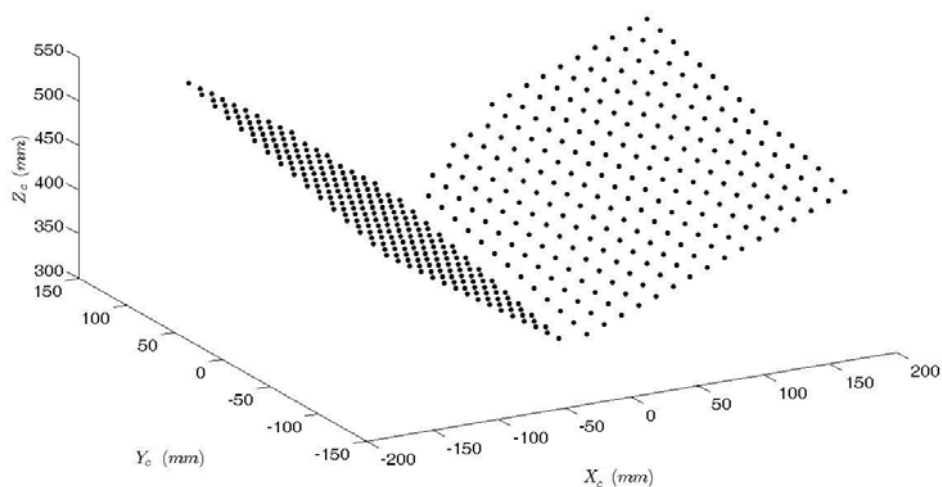


Figura 5.8. Puntos 3D proporcionados por Heikkila en el sistema de referencia de la cámara, usados en el proceso de auto-calibración. Hay 491 puntos 3D distribuidos en dos planos con un ángulo de 90° entre ellos.

La Tabla 5.2 muestra los parámetros obtenidos en la calibración de la cámara mediante un método típico de calibración de una cámara [Zhang 99][Zhang 00] y mediante el método propuesto de recalibración. Obsérvese que en la Tabla 5.2 las matrices de rotación vienen dadas en la notación de rodrigues [HZ 00]. Por otra parte la Tabla 5.2 muestra que los resultados son iguales en ambos casos.

En la Tabla 5.3 se dan los errores de retroproyección para ambos métodos. La Tabla 5.3 muestra que los errores de retroproyección obtenidos son similares para ambos métodos y ambos ejes.

Estos resultados muestran una muy buena determinación de los parámetros de calibración, validando el método de auto-calibración.

	Parámetros Zhang	Parámetros Auto-Calibración
f^x (px)	1037	1037
f^y (px)	1034	1034
c^x (px)	367	367
c^y (px)	306	306
k_1	-0.2	-0.2
k_2	0.2	0.2
p_1	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
p_2	$-3 \cdot 10^{-4}$	$-3 \cdot 10^{-4}$
R	$[7 ; 5 ; -4] \cdot 10^{-3}$	$[7 ; 5 ; -4] \cdot 10^{-3}$
t (mm)	$[-9.98 \cdot 10^1 ; 1.12 ; 5 \cdot 10^{-2}]$	$[-9.98 \cdot 10^1 ; 1.12 ; 5 \cdot 10^{-2}]$

Tabla 5.2. Parámetros de calibración obtenidos mediante el método de Zhang y mediante el método propuesto de auto-calibración. Los parámetros de distorsión radial y tangencial se denotan con los coeficientes k_1 , k_2 y p_1 , p_2

	Eje X Cámara	Eje Y Cámara
Error retroprojection Zhang (px)	0.06	0.04
Error retroprojection Auto-Calibración (px)	0.04	0.03

Tabla 5.3. Errores de retroproyección obtenidos mediante el método de Zhang y mediante el método de auto-calibración propuesto

El siguiente ejemplo consiste en usar una pirámide de metal mecanizada y calibrada previamente para testear el método de multiresolución propuesto. Esta pirámide es la misma que la utilizada en el Capítulo 4 para validar el método de multiresolución local. La Figura 4.8 muestra una imagen de dicho objeto.

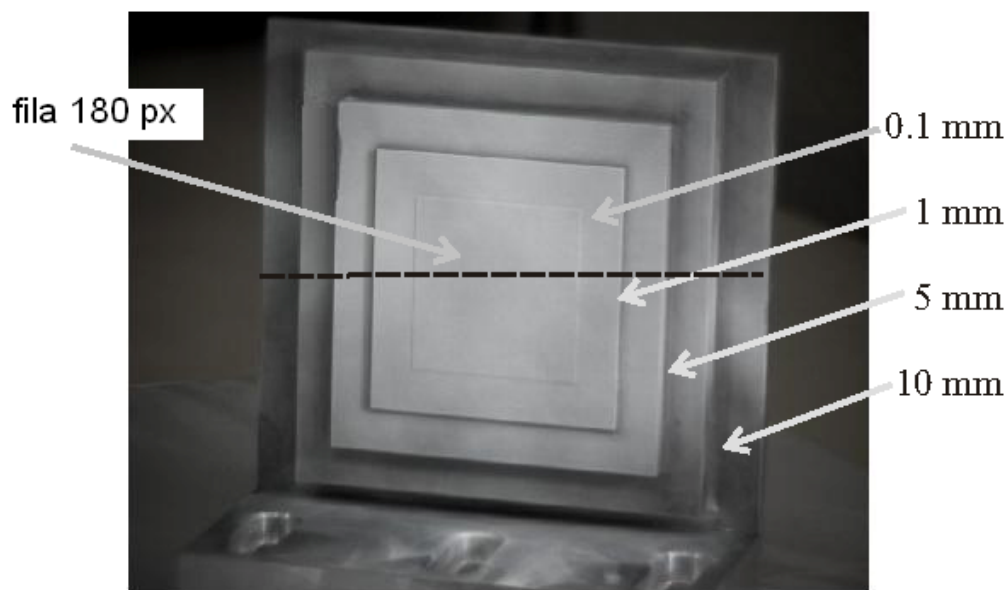


Figura 5.9. Pirámide metálica mecanizada con los distintos escalones indicados. Se muestra la fila 180 px mediante una línea discontinua negra.

Para validar el método global de multiresolución se han obtenido tres medidas para obtener una medida en multiresolución. Inicialmente, se adquiere una medida

3D mediante el sistema **C-P** inicialmente calibrado. Seguidamente, el proyector se modifica, reduciendo el área proyectada y aumentando el ángulo de triangulación (**C-P'**). Finalmente, la cámara se cambia a una nueva configuración, reduciéndose en área observada y aumentándose el ángulo de triangulación (**C'-P'**). La Figura 5.10 muestra un perfil de la coordenada de profundidad obtenida con las configuraciones **C-P**, **C-P'** y **C'-P'** a través de la fila 180 px, indicada en la Figura 5.9 con una línea negra quebrada.

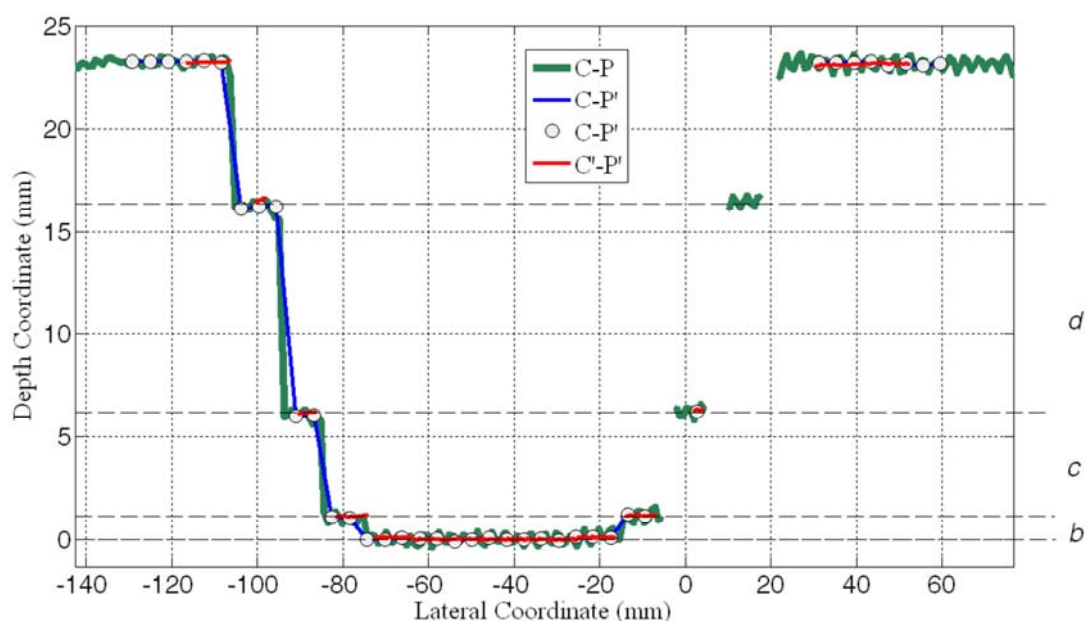


Figura 5.10. Coordenada de profundidad a través de la fila 180 px de la Figura 5.9 obtenida mediante las configuraciones **C-P**, **C-P'** y **C'-P'**

De la Figura 5.10 se observa que las diferentes medidas se superponen perfectamente así como la diferente resolución en profundidad obtenida con las diferentes configuraciones. Los saltos de 1, 5 y 10 mm vienen representados mediante las letras *b*, *c* y *d*. El salto más pequeño (0.1 mm) de la pirámide no se observa en la Figura 5.10. Los valores computados de los saltos *b*, *c* y *d* se dan en la Tabla 5.4

	C-P	C-P'	C'-P'
d (mm)	9.1	10.1	10.2
c (mm)	4.9	4.94	5.0
b (mm)	0.95	1.1	1.1

Tabla 5.4. Valores de los saltos b , c y d de la Figura 5.10 obtenidos a partir de las diferentes configuraciones. Todos los valores se dan en milímetros

En la Tabla 5.4 se muestra que los valores obtenidos para los escalones son muy similares en todas las configuraciones.

Para mostrar el incremento de la resolución en profundidad entre las distintas configuraciones la Figura 5.11 muestra un perfil de la parte central de la Figura 5.10

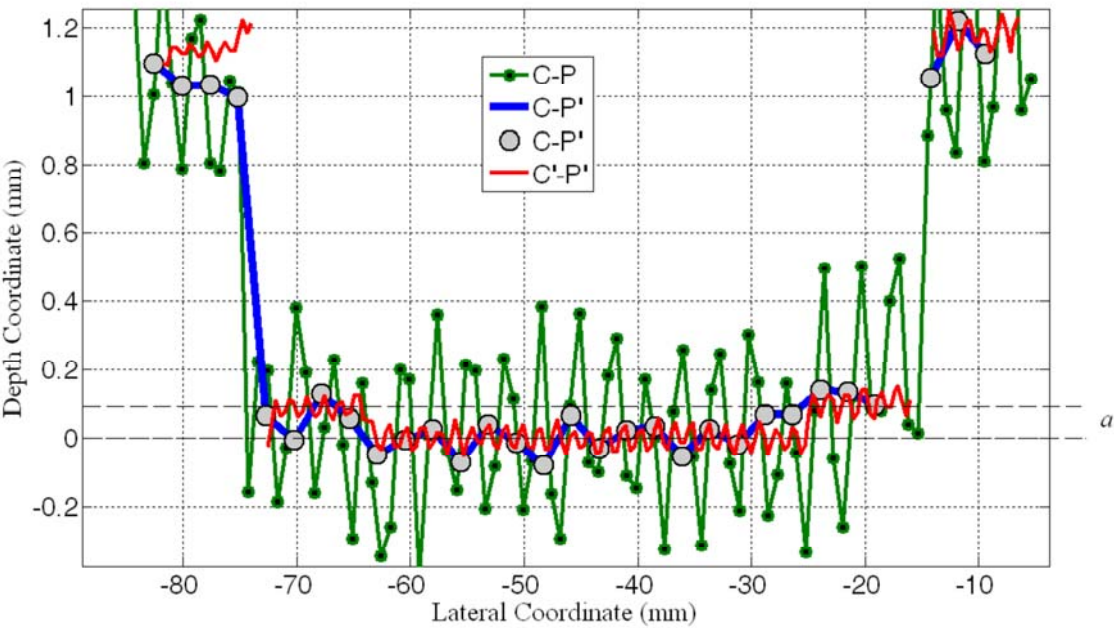


Figura 5.11. Coordenada de profundidad a través de la parte central de la fila 180 px de la Figura 5.9 obtenida mediante las configuraciones $C-P$, $C-P'$ y $C'-P'$

En la Figura 5.11 se aprecia claramente el escalón de 0.1 mm en la medida correspondiente a la configuración **C'-P'**. Para cuantificar el incremento de resolución en profundidad se ha obtenido el error cuadrático medio entre el plano de mejor ajuste y la coordenada de profundidad para la parte central plana de la pirámide. Los resultados se muestran en la Tabla 5.5 donde se observa un aumento en la resolución de profundidad de un factor 7 entre las medidas obtenidas con las configuraciones **C-P** y **C'-P'**.

<i>rms</i> error (C-P) (mm)	0.21
<i>rms</i> error (C-P') (mm)	$7.1 \cdot 10^{-2}$
<i>rms</i> error (C'-P') (mm)	$3.0 \cdot 10^{-2}$
<i>rms</i> (C-P) / <i>rms</i> (C'-P')	7

Tabla 5.5. Error cuadrático medio entre el plano de mejor ajuste y la coordenada de profundidad para la parte central plana de la pirámide

Obsérvese que con respecto a una medida 3D convencional compuesta por una medida de fase en una dirección y un proceso de triangulación, el método propuesto necesita de al menos seis medidas (dos medidas para la configuración **C-P**, dos para la configuración **C-P'** y dos para **C'-P'**), un proceso de auto-calibración y un procedimiento de triangulación. Este aumento de complejidad está justificado por la capacidad del método propuesto de obtener una medida con varias resoluciones de profundidad, que hace que sea posible su uso en situaciones en las que un método de medida 3D convencional no es aplicable.

5.4 Conclusiones

En este capítulo se ha presentado un método de multiresolución que permite obtener una medida 3D de un objeto extenso con alta resolución en profundidad. El método propuesto no necesita realizar ningún post-proceso de registro y no requiere que el objeto sea localmente plano, restricción necesaria en el método expuesto en el Capítulo 4. La técnica consiste en cambiar de forma dinámica el sistema de medida 3D para adaptarlo a la sensibilidad de profundidad necesaria para inspeccionar con detalle una parte del objeto a medir. Este proceso puede repetirse tantas veces como sea necesario, por lo que el sistema es muy flexible.

Los resultados experimentales muestran una mejora en la resolución de profundidad de aproximadamente un orden de magnitud.

El trabajo presentado en este capítulo ha dado lugar a una publicación referenciada [Vargas 09]

Capítulo 6

Medida de superficies no cooperativas

“No basta saber, se debe también aplicar. No es suficiente querer, se debe también hacer”

Johann Wolfgang Goethe

“Todo arde si le aplicas la chispa adecuada”

Enrique Bumbury

En las superficies en las que existen simultáneamente regiones muy brillantes y muy oscuras es inviable el uso de técnicas ópticas estándar de medida 3D. El motivo radica en el rango finito de niveles de gris que puede medir una cámara (con una cámara de 8 bits de profundidad se distinguen 256 niveles de gris diferentes). De esta forma, si el tiempo de exposición de la cámara se fija para observar de forma óptima las regiones de baja reflectividad, las regiones brillantes aparecerán saturadas, perdiéndose por tanto toda la información contenida en estas. Por otra parte, si el tiempo de exposición se fija para observar las regiones brillantes, los detalles en las zonas oscuras aparecerán ocultos por el ruido.

En el presente trabajo se presenta un método de medida tridimensional basado en un sistema típico cámara-proyector que permite obtener medidas de forma rápida, con alta densidad de puntos tridimensionales y de forma robusta en superficies no cooperativas. El método propuesto consiste en aumentar el rango dinámico de la cámara, utilizando un conjunto de medidas de Gray-Code y Phase-Shifting para distintos tiempos de integración de la CCD. Después de un proceso de calibración, en el que se obtiene la función de respuesta del sistema formador de imagen, se obtiene una medida de rango extendido del Gray-Code y del Phase-Shifting. Estos mapas se utilizan para obtener una medida 3D de rango extendido. Este método se ha aplicado con éxito a la inspección de microchips. Los resultados experimentales en los que se presentan medidas densas de objetos con grandes variaciones en la reflectancia demuestran la validez del método. El trabajo mostrado en este capítulo ha dado lugar a una publicación referenciada [VKQG 08]

6.1 Introducción

Los métodos de triangulación activa estándar no son aplicables para la medida 3D de superficies no cooperativas. Estas superficies están caracterizadas por presentar una gran variación espacial de la reflectividad. En una superficie no cooperativa existen regiones muy brillantes (con alta reflectividad) y muy oscuras (con baja reflectividad). Si se observan estas superficies con una cámara y el tiempo de exposición se ajusta para observar los detalles en las zonas oscuras, los detalles en las regiones brillantes se pierden debido a sobreexposición. La cámara está saturada en dichas regiones y no es posible observar variaciones de intensidad por encima del valor de saturación. Por otro lado, si el tiempo de integración se fija para observar los detalles en las zonas brillantes, la información en las regiones oscuras se pierde debido a que el nivel de señal es comparable al ruido. En la Figura 6.1 se muestra un objeto típico con regiones muy brillantes y muy oscuras.

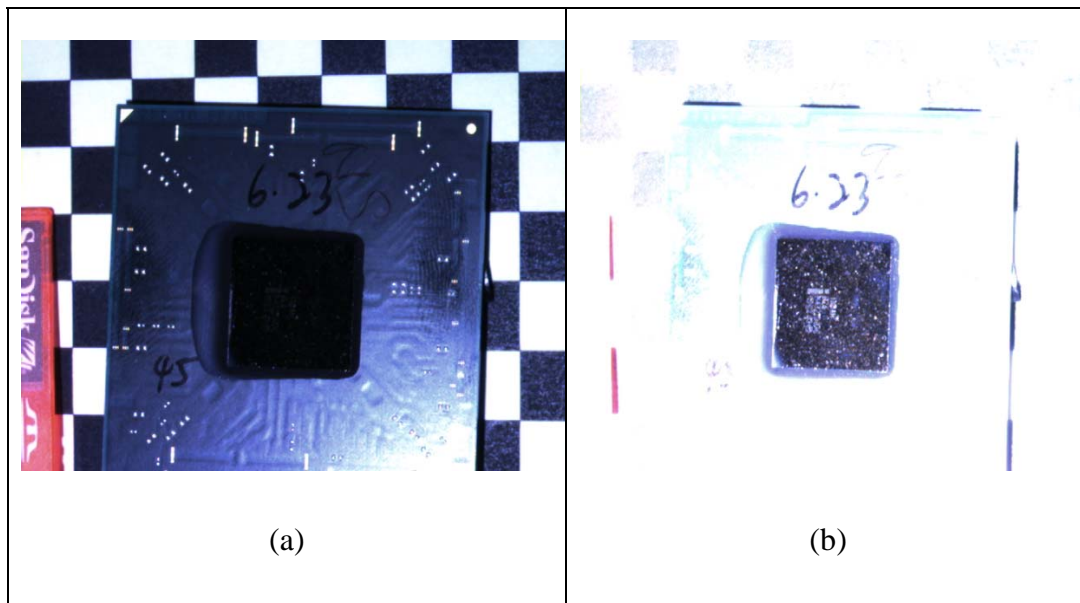


Figura 6.1 Imagen de un objeto con una gran variación de la reflectividad sobre su superficie. En (a) el objeto se observa con una cámara cuyo tiempo de exposición se ha ajustado para observar las regiones brillantes. En (b) el objeto se observa con un tiempo de exposición ajustado para observar la región central oscura.

La Figura 6.1 muestra imágenes de un objeto cuya superficie presenta grandes variaciones en la reflectividad (superficie no cooperativa). En la Figura 6.1 (a) se

selecciona un tiempo de exposición bajo para observar las regiones brillantes mientras que en la Figura 6.1 (b) el tiempo de integración de la cámara es alto para capturar la región central oscura. Obsérvese que la información que adquirimos en una de las imágenes la perdemos en la otra.

Los métodos para extender el rango dinámico de una cámara consisten en fusionar en una única imagen (imagen de rango extendido) imágenes con diferentes tiempos de exposición. Tras un proceso de calibración radiométrico, en el que se obtiene la curva de respuesta de la cámara salvo un factor de escala desconocido, se obtiene una imagen de rango dinámico extendido cuyos píxeles son proporcionales al valor real de la irradiancia incidente. Obsérvese que para una cámara en la que no se ha realizado un proceso de calibración radiométrico, la irradiancia incidente y la intensidad medida por la cámara están relacionadas mediante una función no-lineal desconocida, llamada como la curva de respuesta de la cámara y por tanto estas magnitudes en general no son proporcionales. [Debevec 97][Grossberg 02][Scharstein 03][Cerman 06]. De esta forma, si un píxel en la CCD tiene un valor de intensidad en niveles de gris que es el doble al de otro píxel, generalmente sus valores respectivos de irradiancia no serán el doble uno de otro. Es decir, la cámara transforma los valores de irradiancia entrantes mediante una función no-lineal en valores de intensidad en unidades de niveles de gris.

En una cámara digital convencional, la luz llega inicialmente a la óptica, que la enfoca sobre un sensor formado por pequeñas celdas fotosensibles que transforman intensidad luminosa en carga eléctrica. Estas celdas se exponen a la irradiancia incidente durante un tiempo determinado Δt (tiempo de integración de la cámara). La respuesta de estas celdas fotosensibles a la exposición E (producto de la irradiancia (IR) que recibe la celda y el tiempo de integración Δt .) es una función no-lineal llamada la curva característica del sensor. Adicionalmente, en una cámara digital típica existe un conversor analógico-digital que modifica de nuevo la señal mediante otra función no-lineal. Por tanto, la curva de respuesta de la cámara es una función no-lineal que corresponde al producto de una serie de funciones no-lineales intermedias desconocidas. En la Figura 6.2 se muestra el proceso de adquisición de imagen de una cámara digital.

En esta figura se muestra adicionalmente las funciones intermedias desconocidas que transforman la irradiancia incidente en valores de intensidad en niveles de gris.

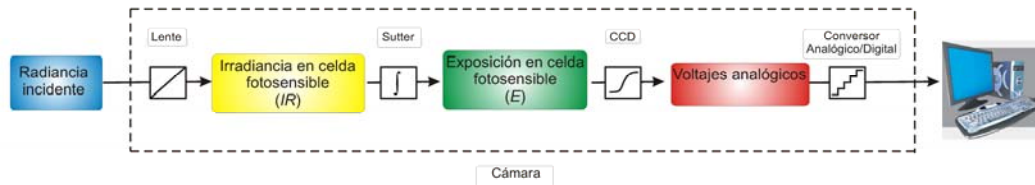


Figura 6.2 Proceso de adquisición de imagen mediante una cámara digital.

En este capítulo se propone el uso de las técnicas de rango extendido para la medida tridimensional de superficies no cooperativas. Con esta finalidad se obtiene una fase absoluta de rango extendido mediante GC y PS que finalmente se triangula para obtener una medida 3D. Obsérvese que en este caso la utilización de técnicas de rango extendido para la medida 3D de superficies no cooperativas tiene una utilidad doble. En primer lugar, estas técnicas permiten obtener una medida 3D tanto en regiones muy oscuras como muy brillantes. En segundo lugar mediante estas técnicas se suprime la no-linealidad introducida por la cámara, que como se muestra en [Huntley 99][Crograve 00] es una de las principales fuentes de error en la recuperación de la fase absoluta en un sistema de proyección de franjas.

Este capítulo está organizado en tres partes. En el apartado 6.2 se presenta el método propuesto para la medida de superficies no cooperativas. En el apartado 6.3 se aplica el método a la medida 3D de microchips. Finalmente en el apartado 6.4 se exponen las conclusiones

6.2 Método Propuesto

En este trabajo se ha usado un sistema de triangulación activo consistente en un proyector DLP y una cámara CCD. La cámara adquiere imágenes de las franjas proyectadas por el DLP y distorsionadas por el objeto a medir. La medida 3D de

rango extendido se obtiene a partir de las imágenes proyectadas del GC + PS por el proyector y capturadas por la cámara con diferentes tiempos de exposición.

El Gray-Code, como ya se explico en el Capitulo 2, es una técnica de codificación temporal que consiste en la proyección de una secuencia de patrones binarios. Para cada patrón, los píxel tienen dos posibles valores 0 (no iluminado) o 1 (iluminado).

La decodificación de los patrones de GC es conceptualmente sencilla ya que consiste en decidir si cada píxel está iluminado o no [Krattenthaler 93][Brenner 98][Sansoni 99][Gühring 00][Scharstein 03][Fiorentin 05]. Para decodificar los patrones de GC de forma robusta se pueden proyectar dos patrones de referencia, uno totalmente iluminado y otro totalmente oscuro. De esta forma, se compara cada píxel de las imágenes de GC capturadas con el valor medio de estas dos imágenes de referencia en el mismo píxel. Debido a las propiedades de los objetos que estamos interesados en medir —objetos con superficies no cooperativas— se ha utilizado otra técnica de codificación y decodificación mediante GC consistente en proyectar cada patrón con su inverso [Scharstein 03][Salvi 04]. Esta técnica es más robusta que la técnica anterior basada en dos patrones de referencia, pero tiene el inconveniente que necesita proyectar y capturar un gran número de imágenes.

En la Figura 6.3 se muestra un ejemplo de una codificación de 3 bits mediante Gray-Code en el caso de usar dos patrones de referencia (a) y para el caso de proyectar cada patrón con su inverso (b). En la Figura 6.3 (a) se observa que los dos primeros patrones (empezando a contar desde la izquierda) son los dos patrones de referencia, un patrón totalmente iluminado (totalmente blanco) y un patrón totalmente oscuro (totalmente negro). Los otros tres patrones corresponden a los patrones del Gray-Code. En la Figura 6.3 (b) se muestra cada patrón del Gray-Code con su inverso. En este caso, un píxel iluminado en el patrón directo está oscuro en el inverso. De esta forma se determina de forma muy robusta si un píxel en el patrón directo está iluminado o no comparando su intensidad con el valor correspondiente en el patrón inverso.

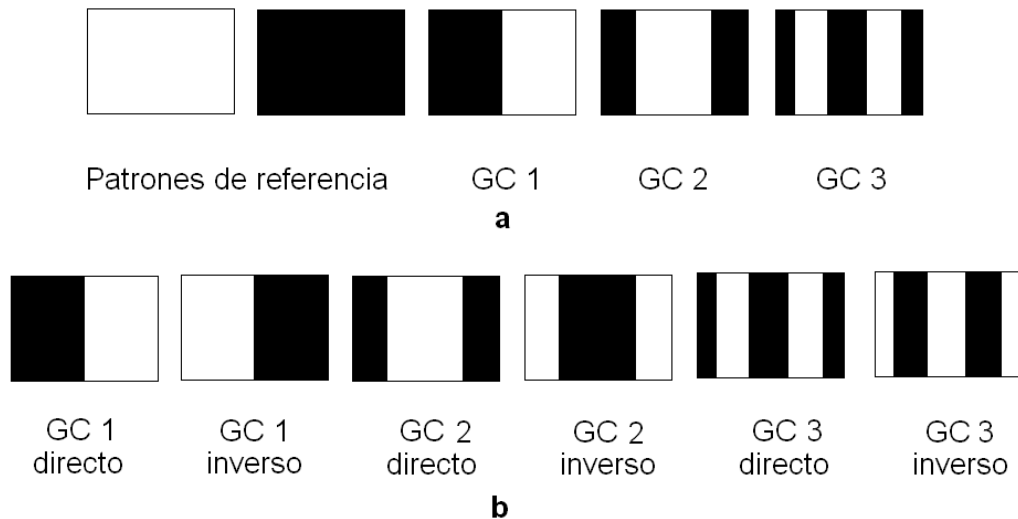


Figura 6.3 Patrones necesarios para codificar 3 bits de información mediante Gray-Code para el caso de proyectar dos patrones de referencia (a) y cada patrón con su inverso (b)

La medida mejorada del GC se realiza a partir de medidas del GC obtenidas a diferentes tiempos de integración de la cámara. Para cada píxel y para cada patrón del GC se selecciona el tiempo de integración que proporciona el mayor valor para la diferencia de intensidades entre el patrón directo y el inverso, descartando los tiempos de integración con intensidades superiores a 170 niveles de gris. Más tarde se explica porque se selecciona un valor de corte de 170 niveles de gris. De esta forma, se selecciona para cada píxel y para cada patrón del GC proyectado (GC1, GC2, GC3 en la Figura 6.3) la imagen de este obtenida por la cámara con el tiempo de integración para el que se ha obtenido el valor más elevado de la diferencia de intensidades entre el patrón directo e inverso sin superar el valor de corte (170 niveles de gris). Se ha utilizado un valor de corte para la intensidad de 170 niveles de gris para asegurar que no se tenía ningún píxel saturado. En nuestro caso Este valor de corte se ha obtenido experimentalmente a partir de la curva de respuesta de la cámara y es válido únicamente para la cámara utilizada. El método para obtener este valor de corte se explica más adelante. La consecuencia de tener píxeles saturados es muy grave debido al efecto de desbordamiento o efecto *blooming* en estos píxeles. La consecuencia de este desbordamiento es un aumento de la intensidad en los píxeles vecinos a los píxeles saturados. Por tanto, se produce un falseamiento en el valor de la anchura real de las franjas obtenidas mediante GC [Krattenthaler 93]. La Figura 6.4

muestra un esquema del proceso para obtener una medida mejorada del GC para superficies no cooperativas.

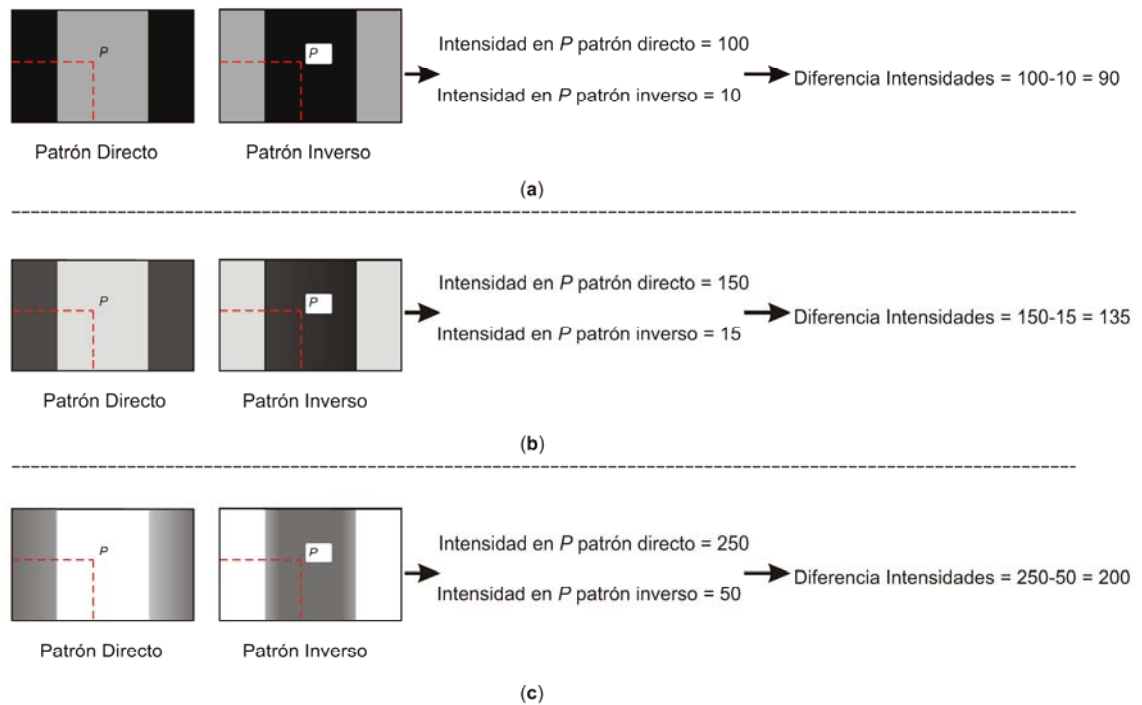


Figura 6.4 Esquema del proceso para obtener una medida mejorada del GC para superficies no cooperativas. En (a), (b) y (c) se muestran un patrón del GC y su inverso obtenidos para distintos tiempos de exposición de la cámara.

En las Figuras 6.4 (a), (b) y (c) se muestran las diferencias de intensidad en un píxel P para los patrones directos e inversos obtenidos con distintos valores del tiempo de exposición. En la Figura 6.4 (c) se obtiene el máximo valor para esta diferencia, no obstante el valor de la intensidad en el patrón directo supera al valor de corte (170 niveles de gris) y por tanto no se usa este valor del tiempo de integración. Obsérvese que la intensidad para los píxeles iluminados en el patrón directo de la Figura 6.4 (c) está saturada y que aparece en los píxeles oscuros que son vecinos el efecto de desbordamiento aumentándose su intensidad.

El método de codificación mediante Phase-Shifting (PS) consiste en la proyección de un conjunto de patrones sinusoidales desfasados entre ellos una cantidad conocida. Típicamente, se usa un método de cuatro pasos con desfases 0,

$\pi, \frac{\pi}{2}, 3\frac{\pi}{2}$ radianes. En este caso, las imágenes capturadas por la cámara son del tipo

$$I_i(m_c) = A(m_c) + B(m_c) \cos \left[\Phi(m_c) - i \frac{\pi}{2} \right] \quad (6.1)$$

donde $i = [0, 1, 2, 3]$, $I_i(m_c)$, $A(m_c)$ y $B(m_c)$ son la intensidad recogida por la cámara, la intensidad promedio y la modulación de las franjas en el píxel $m_c = [u_c, v_c, 1]^T$ respectivamente; $\Phi(m_c)$ representa el valor de la fase. Esta fase se obtiene a partir de (6.1) mediante,

$$\Phi(m_c) = \arctan \left[\frac{I_1(m_c) - I_3(m_c)}{I_0(m_c) - I_2(m_c)} \right] \quad (6.2)$$

Para una información más detallada del método de codificación mediante Phase-Shifting consultar el Capítulo 2.

Para obtener una medida de rango extendido de la fase (Φ) que no esté afectada por la no linealidad introducida por la curva de respuesta de la cámara, se realiza inicialmente una calibración radiométrica de la cámara. Este proceso de calibración consiste en determinar la relación no-lineal que existe entre la exposición que llega al CCD y la señal devuelta por la cámara.

Para realizar el proceso de calibración radiométrico de la cámara y obtener la función de transferencia de la misma (T) se toman un conjunto de imágenes de una escena estática con diferentes tiempos de exposición conocidos (Δt_j). Esta función de transferencia nos proporciona la relación entre el valor de la intensidad en el píxel de la cámara m_c , ($I(m_c)$), y la exposición incidente en la celda fotosensible correspondiente ($E(m_c, \Delta t_j)$),

$$I_j(m_c) = T[E(m_c, \Delta t_j)] \quad (6.3)$$

Es razonable asumir que la función de transferencia de la cámara, T es monótonamente creciente, de tal forma que su inversa (T^{-1}) está bien definida. Teniendo en cuenta que la exposición $E(m_c, \Delta t_j)$, corresponde al producto de la irradiancia $IR(m_c)$, por el tiempo de exposición Δt_j , la expresión (6.3) se reescribe como,

$$I_j(m_c) = T[IR(m_c)\Delta t_j] \quad (6.4)$$

Asumiendo que la función T es monótonamente creciente,

$$T^{-1}[I_j(m_c)] = IR(m_c)\Delta t_j \quad (6.5)$$

Tomando logaritmos en ambos lados se obtiene,

$$\log[T^{-1}[I_j(m_c)]] = \log[IR(m_c)] + \log[\Delta t_j] \quad (6.6)$$

Simplificando la notación, podemos definir $G = \log[T^{-1}]$, obteniendo por tanto

$$G[I_j(m_c)] = \log[IR(m_c)] + \log[\Delta t_j] \quad (6.7)$$

Obsérvese que en (6.7) la intensidad devuelta por la cámara en el píxel m_c , $I_j(m_c)$ y el tiempo de integración de la CCD, Δt_j son cantidades conocidas. Las variables desconocidas son la irradiancia incidente $IR(m_c)$ y la función G , que suponemos suave y monótona. En la Figura 6.5 se muestra la curva de transferencia (T) representada frente al logaritmo de la exposición para la cámara digital utilizada (Sony DFW-VL500). Obsérvese que en el eje de las abscisas se muestra el logaritmo de la exposición. En la Figura 6.5 se observa el comportamiento monótono creciente de la función de transferencia de la cámara. Por otra parte se observa un marcado comportamiento no-lineal para niveles bajos y altos de la exposición.

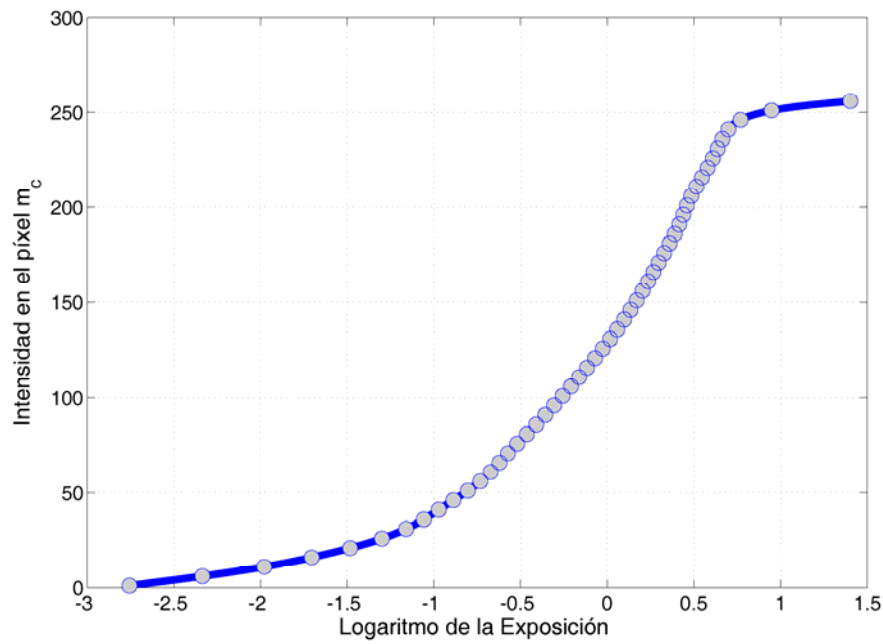


Figura 6.5 Curva de transferencia típica de la cámara digital Sony DFW-VL500 utilizada en este capítulo. En el eje de las ordenadas se muestra el valor de la intensidad en un píxel arbitrario en niveles de gris. En el eje de las abscisas se muestra el logaritmo de la exposición.

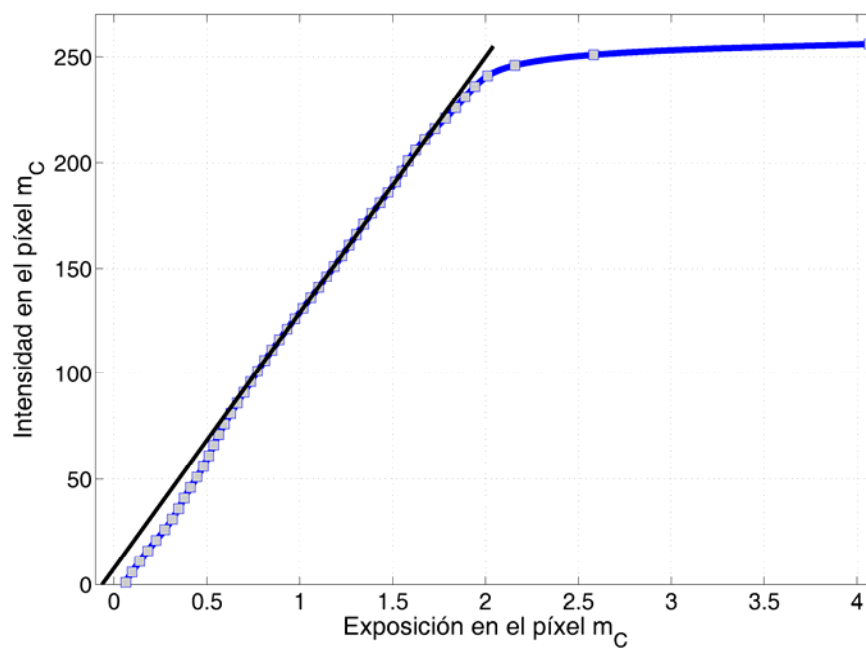


Figura 6.6 Curva de transferencia típica de la cámara digital Sony DFW-VL500 utilizada en este capítulo. En el eje de las ordenadas se muestra el valor de la intensidad en un píxel arbitrario en niveles de gris. En el eje de las abscisas se muestra la exposición con unidades $W \cdot s/m^2$.

Para niveles altos de la exposición se observa adicionalmente en la Figura 6.5 la saturación del píxel de forma que cambios de la exposición no producen cambios en la intensidad del píxel. Para observar con mayor detalle este comportamiento no-lineal en T , la Figura 6.6 muestra la curva de transferencia representada frente a la Exposición. En la Figura 6.6 se muestra también una línea de color negro que corresponde al ajuste lineal de T en su régimen lineal. De la Figura 6.6 se muestra el marcado comportamiento no-lineal de T para niveles bajos y altos de la exposición. Por otra parte en la Figura 6.6 se observa que para una intensidad de 170 niveles de gris la cámara no se encuentra saturada. Al ser este valor uno de los valores de intensidad más altos para el que la cámara no está saturada se ha elegido como valor de corte.

La finalidad del proceso de calibración radiométrico es obtener la función T y el valor de la irradiancia para cada píxel $IR(m_c)$. Para realizar este proceso de calibración es necesario introducir información adicional. De esta forma, se busca la función T y la irradiancia en cada píxel $IR(m_c)$ que mejor satisfacen la expresión (6.7) desde un punto de vista de mínimos cuadrados. Para ello se impone a priori continuidad y suavidad a la función T , lo que implica imponer continuidad y suavidad a la función G ($G = T^{-1}$). De esta forma la calibración consiste en buscar la función G y los valores de irradiancia $IR(m_c)$ que minimizan la siguiente expresión,

$$\sum_{m_c} \sum_j (G[I_j(m_c)] - \log[IR(m_c)] + \log[\Delta t_j])^2 + \lambda \sum_{I=I_{\min}+1}^{I_{\max}-1} G''[I(m_c)] = 0 \quad (6.8)$$

donde G'' corresponde a la segunda derivada de G y λ es un factor que pesa la suavidad de la función G ; cuanto mas grande sea el valor del escalar λ mas suave será la función G . Obsérvese en (6.8) que obtener la función G solo requiere obtener su valor para un conjunto de valores de intensidad I (valor del niveles de gris en un píxel), que para una cámara con una discretización típica de 8 bits corresponde a un dominio de 256 valores. Obsérvese que mediante (6.8) se obtiene la función G y el logaritmo de la irradiancia $\log[IR(m_c)]$ salvo un factor de escala arbitrario (número real arbitrario distinto de cero).

Obsérvese que no se realiza una calibración radiométrica del proyector. Esto es debido a que únicamente se va a aumentar el rango dinámico de la cámara para detectar variaciones de intensidad por encima y por debajo de su nivel de saturación y corte. La calibración radiométrica del proyector podría corregir su no-linealidad, reduciéndose por tanto errores en la recuperación de la fase absoluta. No obstante, el desarrollo de una calibración radiométrica del proyector incrementaría de forma dramática el número de imágenes a proyectar y capturar y por tanto del tiempo de medida.

Una vez que el proceso de calibración radiométrica ha finalizado se proyectan cuatro patrones sinusoidales desfasados entre ellos y se obtiene para cada patrón una secuencia de imágenes con diferentes tiempos de exposición. Mediante la calibración radiométrica realizada previamente y estos conjuntos de imágenes se obtienen cuatro imágenes sinusoidales de rango extendido [Debevec 97][Grossberg 02][Scharstein 03][Cerman 06]. Estas imágenes de rango extendido tienen dos propiedades muy importantes; por una parte, estas imágenes no están afectadas por las no-linealidades introducidas por la cámara. Por otra parte, el incremento del rango dinámico permite la medida simultánea en las zonas muy brillantes y muy oscuras de la superficie. De esta forma, se obtiene una fase absoluta mejorada utilizando la medida del Gray-Code obtenida mediante el método descrito anteriormente. La fase absoluta mejorada se triangula para obtener una medida 3D como se mostró en el apartado 2.4 del Capítulo 4.

6.3 Medida 3D de microchips mediante triangulación activa

Las empresas dedicadas a la producción de microchips requieren técnicas de inspección tridimensional para garantizar la calidad de sus productos. Los requerimientos necesarios para estas técnicas son la velocidad, repetibilidad y flexibilidad. Típicamente los microchips se miden mediante sistemas de medida 3D basados en el contacto con el objeto, como los CMM (*Coordinate Measurement Machines*). Estos sistemas tienen limitaciones, como su alto coste,

su baja velocidad de medición y su pobre resolución espacial. Los métodos ópticos de medida 3D son candidatos muy interesantes para reemplazar a estos sistemas debido a su capacidad de medida sin contacto y a campo completo, su gran velocidad, su bajo coste, su gran flexibilidad así como la alta resolución espacial obtenida en sus medidas. Sin embargo, las técnicas ópticas de medida 3D no se pueden aplicar directamente para la inspección de microchips debido a las propiedades intrínsecas de estos dispositivos. Los microchips se caracterizan por presentar regiones de muy alta reflectividad (muy brillantes) y otras muy oscuras. Una imagen de un microchip típico se muestra en la Figura 6.7

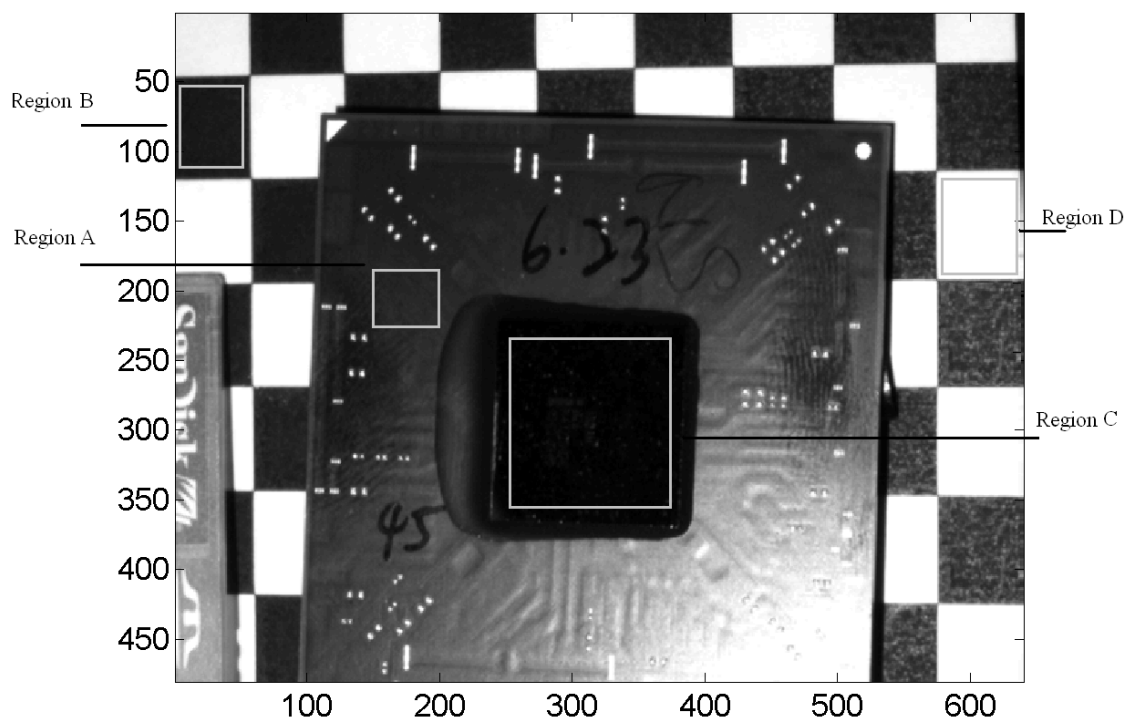


Figura 6.7 Imagen de un microchip típico. Las regiones A, B, C y D muestran zonas con diferente reflectividad.

Obsérvese que en la Figura 6.7 las regiones *C* y *D* muestran una zona muy oscura y brillante respectivamente mientras que las regiones *A* y *B* muestran zonas con niveles de gris intermedios.

Seguidamente se va aplicar la técnica expuesta en el apartado 6.2 a la inspección y caracterización de microchips como el mostrado en la Figura 6.6 con

la finalidad de obtener una medida densa, precisa, rápida y sin que sea necesario el contacto con el objeto a medir.

6.3.1 Resultados Experimentales

La técnica de medida expuesta en este capítulo se aplica en un montaje formado por una cámara *firewire* (Sony DFW-VL500) de 8 bits y un proyector comercial. La óptica del proyector se ha modificado para poder reducir el campo de vista proyectado a unos pocos milímetros. En el Apéndice II se muestra el método utilizado para reducir el campo de vista proyectado. La Figura 6.7 muestra un ejemplo de los tipos de objetos que estamos interesados medir. Obsérvese la diferente reflectividad que tiene la superficie del microchip. La Figura 6.8 muestra una medida 3D obtenida mediante un CMM.

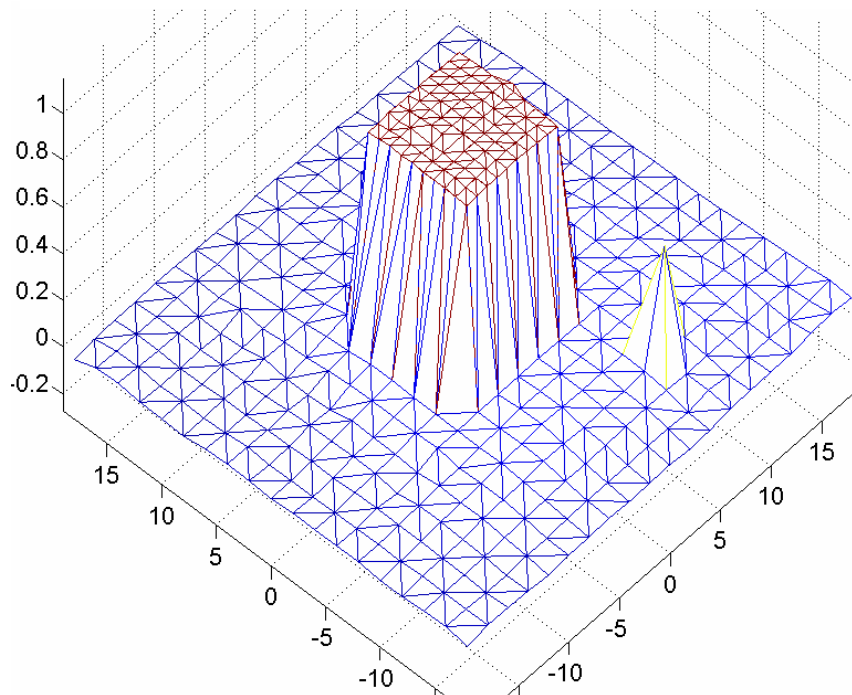


Figura 6.8 Medida 3D del objeto mostrado en la Figura 6.6 mediante un CMM

Obsérvese que la región oscura en el centro de la imagen de la Figura 6.7 corresponde a la elevación mostrada en la Figura 6.8.

Con la finalidad de obtener la medida mejorada del GC, se obtienen un conjunto de diez medidas de GC con diferentes tiempos de integración de la cámara. Los valores de los diferentes tiempos de integración son 100, 300, 600, 1100, 1500, 1900, 2300, 2700, 3100, y 3500 ms. El valor más pequeño y más grande del tiempo de integración se eligió de forma que se observaran los detalles de las regiones más brillantes y más oscuras respectivamente. La Figura 6.9 muestra por una parte la intensidad obtenida en el píxel $u_c = 100$, $v_c = 100$ de la cámara cuando se observa un patrón proyectado blanco (línea gris) y el valor de la diferencia de intensidades recibidas al observar un patrón blanco y otro negro en el mismo píxel (línea negra).

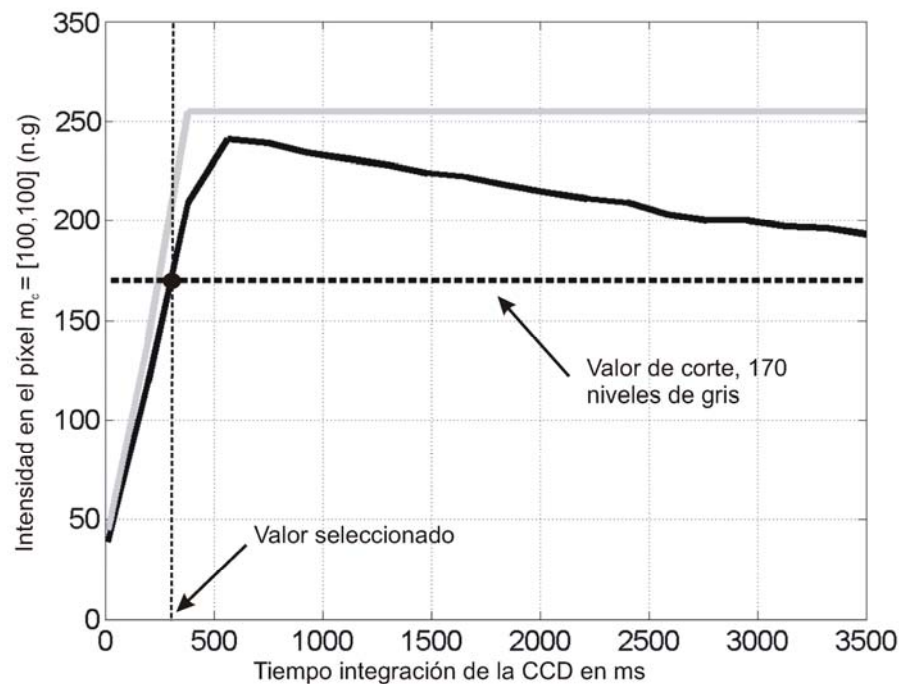
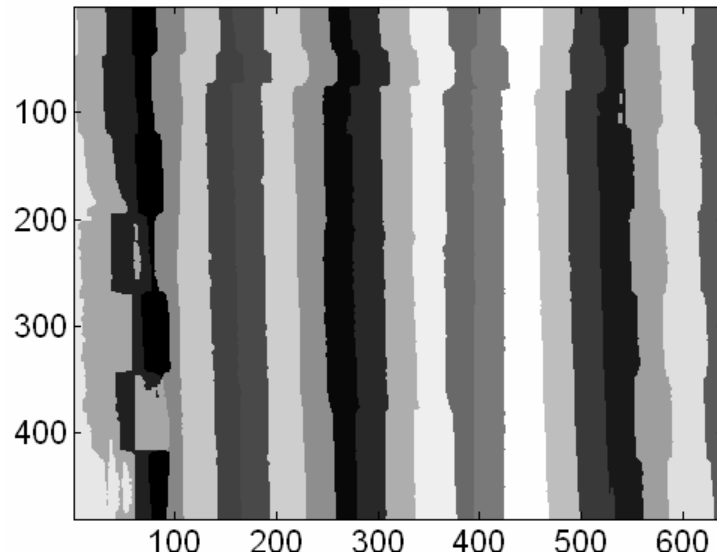


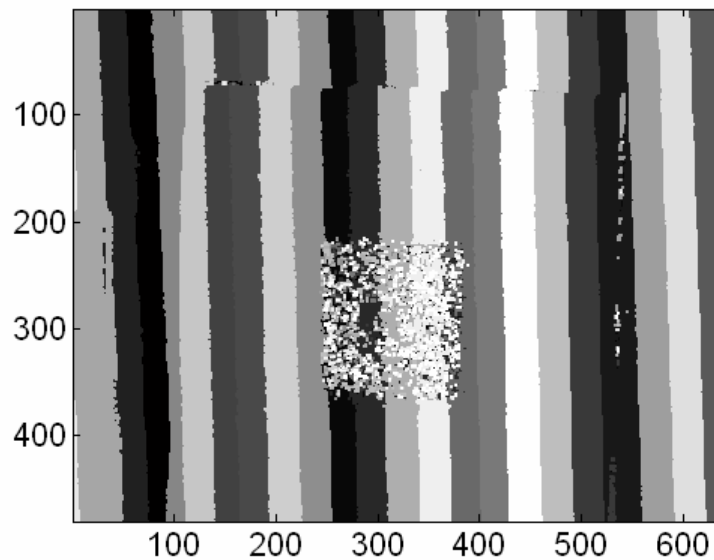
Figura 6.9 Señal devuelta por la cámara al observar el patrón proyectado blanco (línea gris). La línea negra muestra la diferencia entre las intensidades recogidas al observar los patrones blanco y oscuro respectivamente. La línea discontinua muestra el valor de corte, que tiene una intensidad correspondiente a 170 niveles de gris.

En la Figura 6.9 se observa que la máxima diferencia entre las intensidades se obtiene cuando el píxel está saturado al observar el patrón blanco. En ese caso, el efecto de desbordamiento de carga produciría un aumento en la intensidad detectada en los píxeles vecinos. En la Figura 6.9 se muestra adicionalmente el valor del tiempo de exposición seleccionado. Este tiempo de exposición

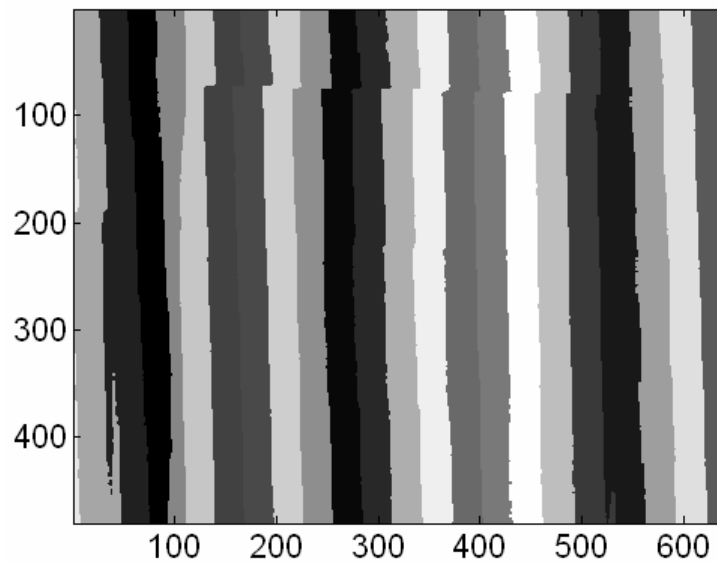
corresponde la máxima diferencia entre intensidades que no sobrepasa al nivel de corte (170 niveles de gris). Para apreciar las consecuencias de este efecto de desbordamiento, la Figura 6.10 muestra la medida del GC para un tiempo de exposición alto (Figura 6.10 (a)) y bajo (Figura 6.10 (b)). Finalmente, la Figura 6.10 (c) muestra el GC computado usando el método propuesto.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.10 Medida del GC con un tiempo de exposición alto (a) y bajo (b). En (c) se muestra el resultado de aplicar el método propuesto.

En la Figura 6.10 (a) se observa claramente que las franjas en las partes oscuras del microchip se miden correctamente, mientras que en las partes brillantes aparece un incremento en la anchura de las franjas. Esto se observa claramente en las zonas de transición entre regiones brillantes y oscuras, como en las zonas entre cuadrados blancos y negros (véase Figura 6.7). En la Figura 6.10 (b) se muestra el GC resultante obtenido con un tiempo de integración bajo. Aquí se está en el caso opuesto; en la Figura 6.10 (b) se obtienen buenos resultados en las regiones brillantes y malos en las oscuras. Obsérvese la medida de la región oscura central. Finalmente en (c) se muestra la medida del GC computado con todos los tiempos de integración usando el método propuesto. Como se observa de la Figura 6.10 (c) se obtienen buenas medidas tanto en las regiones oscuras como brillantes.

Para mostrar las ventajas del método propuesto, la Figura 6.11 muestra la fase medida modulo 2π con un tiempo de exposición bajo. En esta figura se muestra adicionalmente perfiles de la fase modulo 2π en una región de reflectancia intermedia (a), en una región brillante (b) y en una oscura (c) (véase la Figura 6.7).

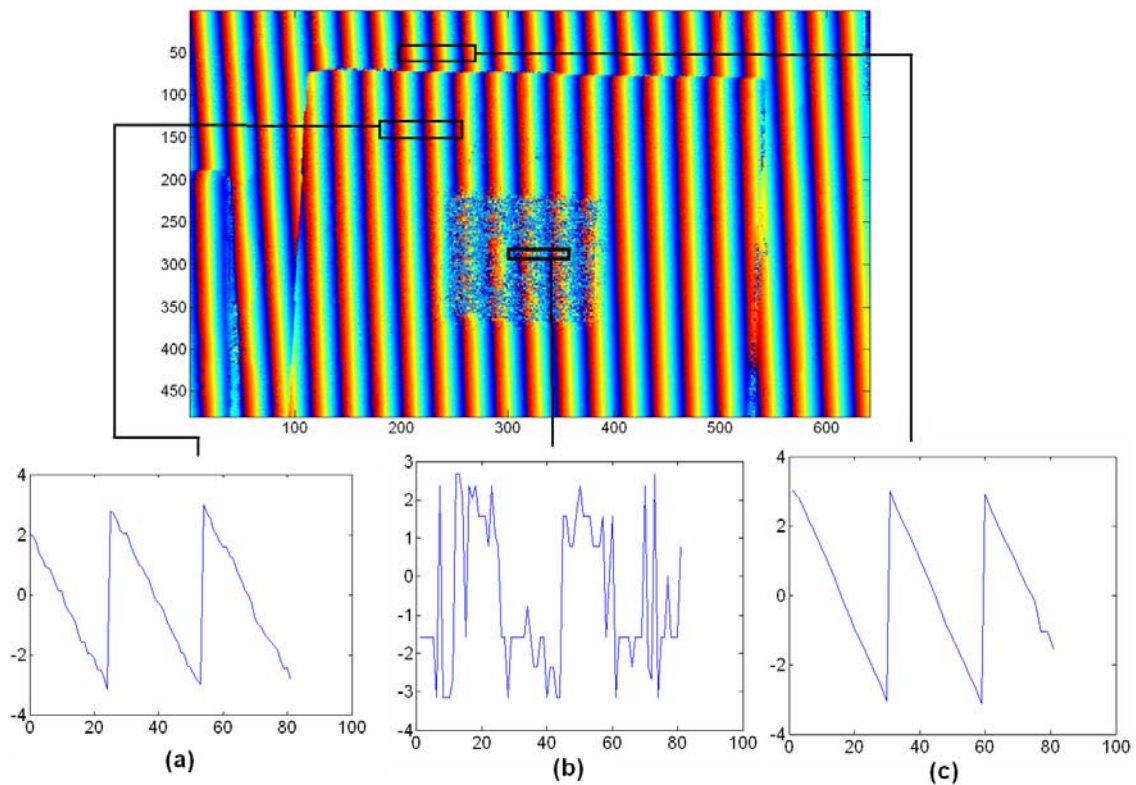


Figura 6.11 Fase módulo 2π en radianes obtenida con un tiempo de integración de la cámara bajo. El color azul significa valores de la fase negativos mientras que el color rojo valores positivos. En (a) se muestra el perfil de la fase en una región de reflectividad intermedia, en (b) se muestra un perfil en una región oscura y en (c) en una región brillante.

Obsérvese que, debido a que en microchip es plano en las regiones en las que se representado la fase en la Figura 6.11, estos perfiles deberían mostrar una forma de diente de sierra perfecta para el caso ideal. De esta forma, de la Figura 6.11 se observa que únicamente obtenemos resultados precisos en la región brillante (Figura 6.11 (c)).

En la Figura 6.12 se muestra la fase modulo 2π medida con un tiempo de exposición alto. Adicionalmente en la Figura 6.12 se muestran perfiles en las mismas regiones que en la Figura 6.11. Como se observa de la Figura 6.12 en las regiones brillantes el sensor se satura y por tanto aparece el efecto de desbordamiento.

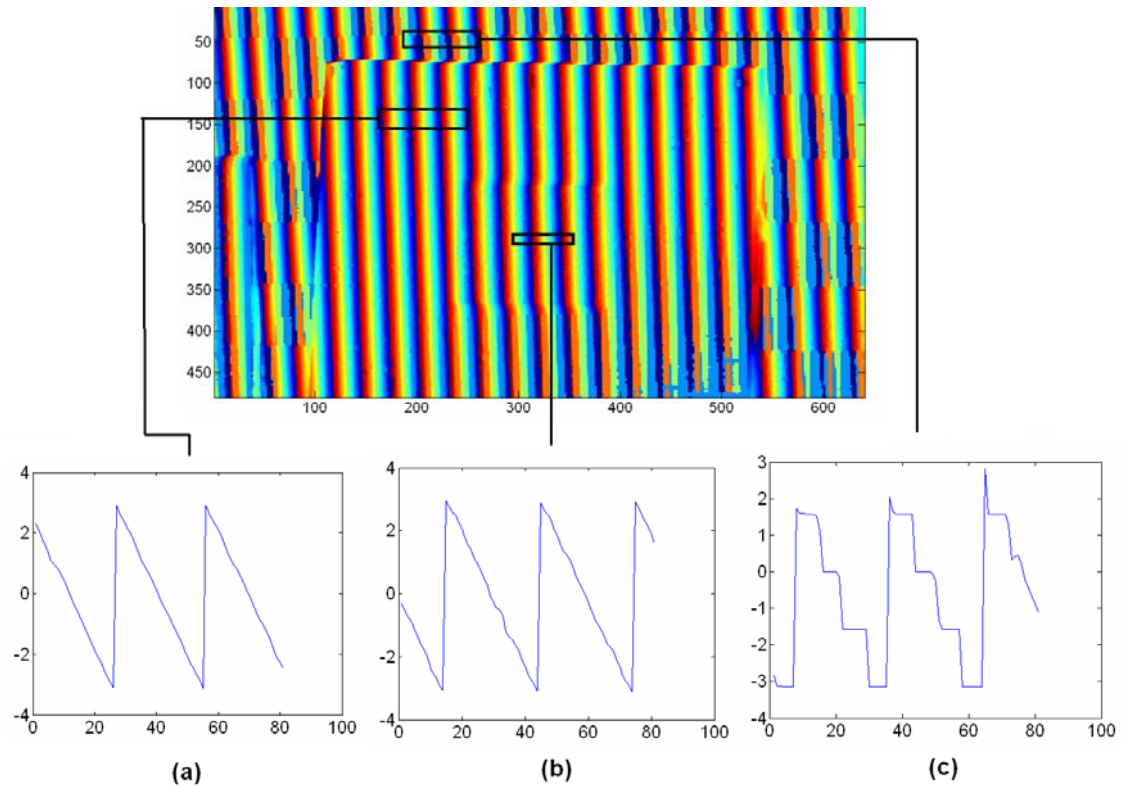


Figura 6.12 Fase módulo 2π en radianes obtenida con un tiempo de integración de la cámara alto. El color azul significa valores de la fase negativos mientras que el color rojo valores positivos. En (a) se muestra el perfil de la fase en una región de reflectividad intermedia, en (b) se muestra un perfil en una región oscura y en (c) en una región brillante.

En la Figura 6.12 se observa que se obtienen buenos resultados para el caso de una región oscura, pero que en las regiones brillantes se miden con mucho error debido al efecto de la sobreexposición. Finalmente en la Figura 6.13 se muestra el resultado de aplicar el método propuesto para la medida de la fase. Como se observa de la Figura 6.13 se obtienen buenos resultados en todas las regiones.

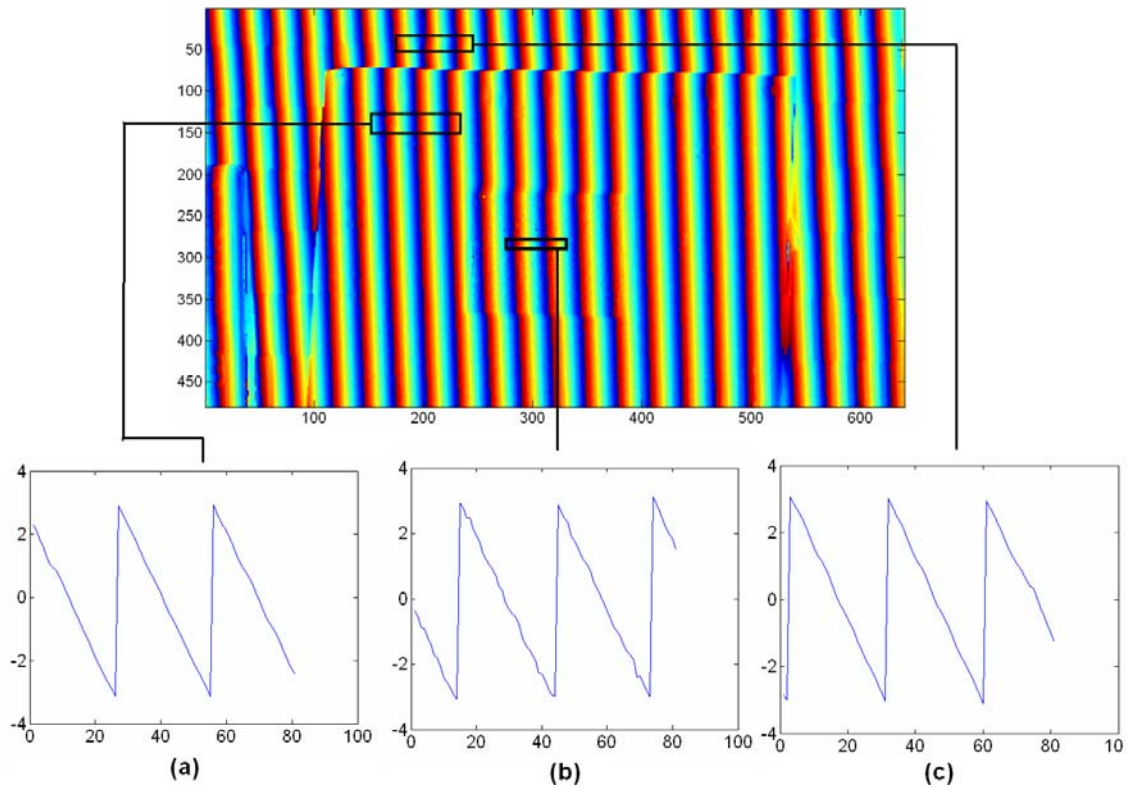


Figura 6.13 Fase módulo 2π en radianes obtenida mediante el método presentado. El color azul significa valores de la fase negativos mientras que el color rojo valores positivos. En (a) se muestra el perfil de la fase en una región de reflectividad intermedia, en (b) se muestra un perfil en una región oscura y en (c) en una región brillante.

Para cuantificar la cantidad de puntos en los que la fase se ha medido de forma fiable, se ha obtenido el mapa de modulación para cada mapa de fase. La modulación se corresponde con el término $B(m_c)$ en la expresión (6.1) y puede obtenerse a partir de los patrones $I_1(m_c)$, $I_2(m_c)$, $I_3(m_c)$, $I_4(m_c)$ como,

$$B(m_c) = \frac{1}{2} \sqrt{[I_0(m_c) - I_2(m_c)]^2 + [I_1(m_c) - I_3(m_c)]^2} \quad (6.8)$$

Esta magnitud da cuenta de la fiabilidad del valor de la fase medida en un píxel en presencia de ruido [Ströbel 96]. De esta forma se puede determinar el porcentaje de puntos medidos de forma precisa calculando el número de ellos que tienen un valor de la modulación superior al 25% del máximo valor teórico (para una cámara de 8bits este numero corresponde a una intensidad de 256 niveles de gris).

La Figura 6.14 muestra una representación entre el porcentaje de puntos medidos de forma precisa en el mapa de fase y el tiempo de exposición utilizado (línea continua con puntos grises). En la Figura 6.14 se muestra también el porcentaje de puntos medidos de forma precisa obtenidos usando todos los tiempos de exposición mediante el método propuesto (línea negra discontinua). Como puede observarse en la Figura 6.14 existen pocos puntos medidos de forma precisa para tiempos de integración fijos y con valores bajos y altos. Esto es debido a que en estas situaciones solamente es posible medir de forma adecuada las regiones brillantes y oscuras. Obsérvese también que el porcentaje de puntos medidos de forma precisa es máximo usando el método propuesto.

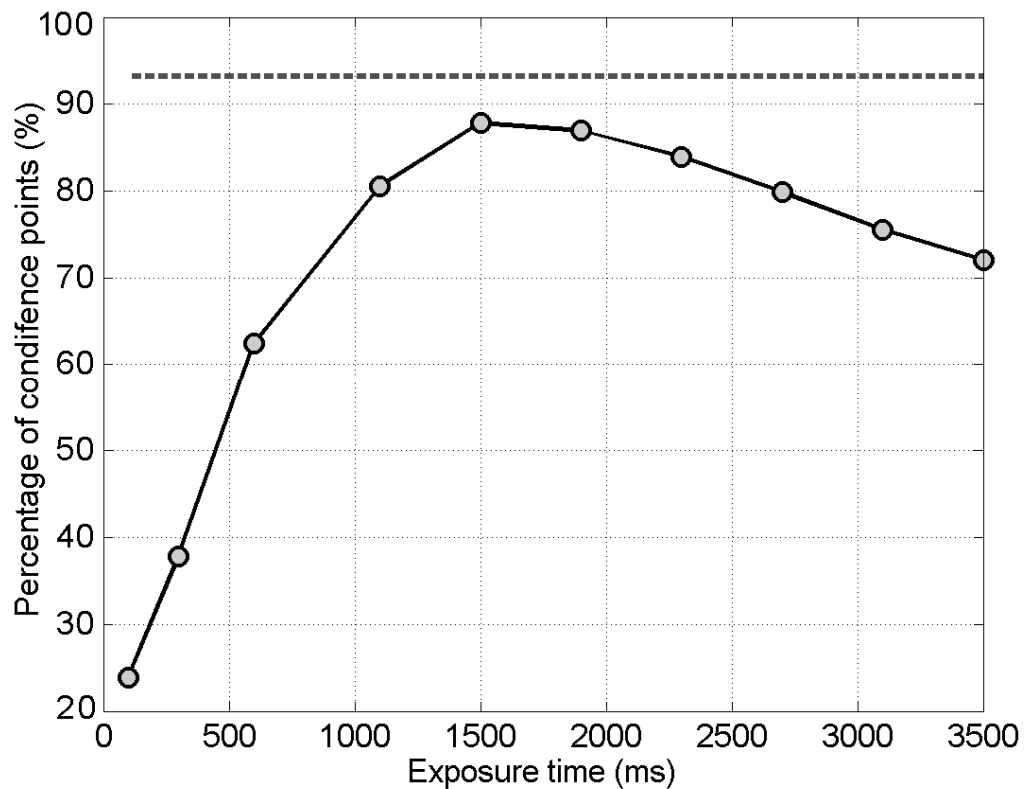


Figura 6.14 Representación del porcentaje de puntos obtenidos de forma precisa a partir en la medida de la fase, obtenidos usando un tiempo de exposición fijo (línea continua con círculos) y mediante el método propuesto (línea discontinua).

Con la finalidad de determinar y comparar los errores obtenidos en la medida de la fase mediante el método propuesto y usando un tiempo de exposición fijo, se han seleccionado cuatro regiones planas del microchip

(regiones *A*, *B*, *C* y *D* en la marcadas en la Figura 6.7). Las regiones *B* y *C* corresponden a zonas oscuras, la región *A* corresponde a una zona brillante y finalmente la región *D* a una zona con una reflectividad intermedia.

La Tabla 6.1 muestra el error cuadrático medio de la diferencia entre la fase absoluta medida para distintos tiempos de exposición y el plano de mejor ajuste obtenido para las diferentes regiones *A*, *B*, *C* y *D*. En la Tabla 6.1 la fase absoluta se ha obtenido mediante tiempos de integración fijos. Obsérvese que si se obtiene la fase absoluta en una región plana esta tiene que ser a su vez una plana y por tanto el error en la recuperación de la fase viene dado por la diferencia entre la fase medida en las diferentes regiones planas (regiones *A*, *B*, *C* y *D*) y el plano de mejor ajuste en dichas regiones.

T. integración (ms)	Región			
	<i>A</i> (rad)	<i>B</i> (rad)	<i>C</i> (rad)	<i>E</i> (rad)
100	0.12	0.53	3	0.044
300	0.050	0.46	1.1	0.020
600	0.030	0.55	0.80	0.051
1100	0.020	0.93	0.80	0.11
1500	0.021	1.1	0.80	0.23
1900	0.025	1.1	0.80	1.8
2300	0.021	1.1	0.80	2.0

2700	0.020	1.2	0.77	2.4
3100	0.020	1.2	0.78	2.7
3500	0.027	1.2	0.78	3.0

Tabla 6.1 Error cuadrático medio de la diferencia entre la fase absoluta medida para distintos tiempos de exposición y el plano de mejor ajuste obtenido para las diferentes regiones A, B, C y D

La Tabla 6.2 muestra el error cuadrático medio de la diferencia entre la fase absoluta medida usando el método propuesto y el plano de mejor ajuste obtenido para las diferentes regiones A, B, C y D.

	Region A	Region B	Region C	Region E
e.c.m (rad)	0.026	1.1	0.76	0.050

Tabla 6.2 Error cuadrático medio de la diferencia entre la fase absoluta medida usando el método propuesto y el plano de mejor ajuste obtenido para las diferentes regiones A, B, C y D

Las Tablas 6.1 y 6.2 muestran que los errores obtenidos en la medida de la fase usando el método propuesto (Tabla 6.2) son similares en todos los casos a los valores más pequeños obtenidos al obtener la fase mediante un tiempo de exposición fijo (Tabla 6.1).

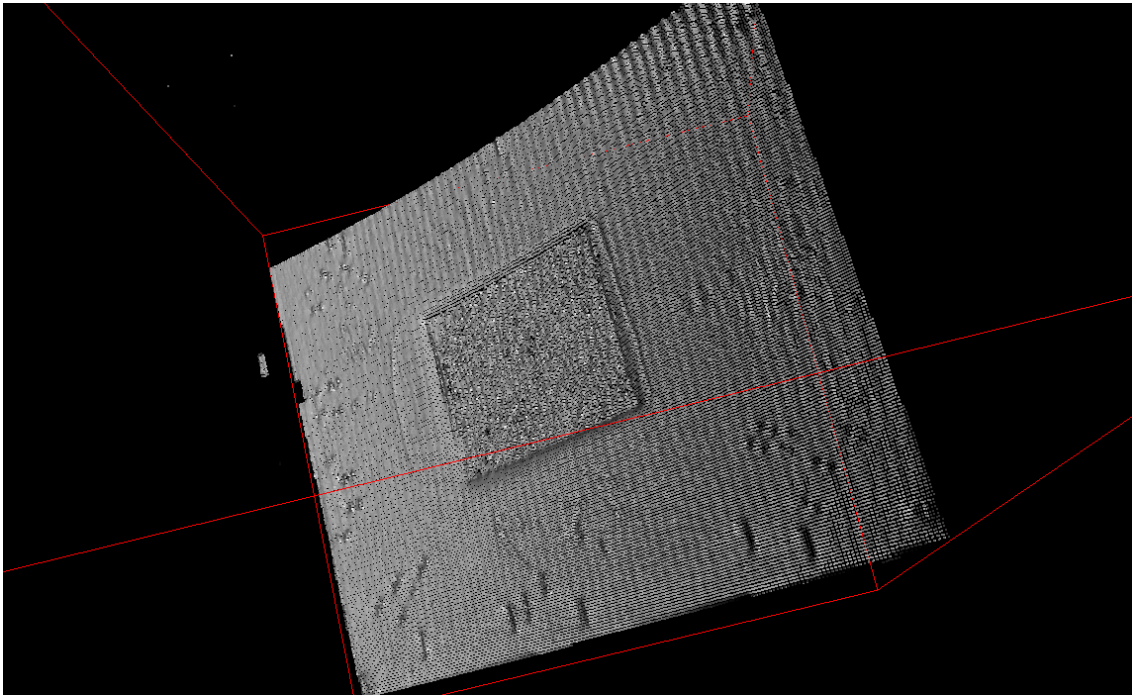


Figura 6.15 Maya 3D del microchip mostrado en la Figura 6.7

Finalmente las Figuras 6.15, 6.16, 6.17 y 6.18 muestran medidas 3D de varios microchips mediante el método propuesto. La Figura 6.15 muestra la maya 3D del objeto mostrado en Figura 6.7. Obsérvese la gran densidad de puntos 3D que se obtienen en comparación con la medida promocionada por un CMM (Figura 6.7). El microchip mostrado en la Figura 6.7 tiene unas dimensiones de aproximadamente $35 \times 35 \text{ mm}^2$ y tiene un escalón en la parte central de 1mm. La medida 3D mostrada en la Figura 6.15 se ha obtenido sin ningún post-procesado. Las Figuras 6.16 y 6.17 muestran respectivamente reconstrucciones 3D de la parte trasera del microchip y del escalón de 1 mm en la parte central del microchip. Estas figuras muestran la gran resolución lateral obtenida en comparación con la medida adquirida mediante un CMM mostrada en la Figura 6.8.

Finalmente la Figura 6.18 muestra una medida 3D de otro tipo de microchip con dimensiones laterales similares al mostrado en la Figura 6.6. Obsérvese la precisión con la que se obtienen los condensadores.

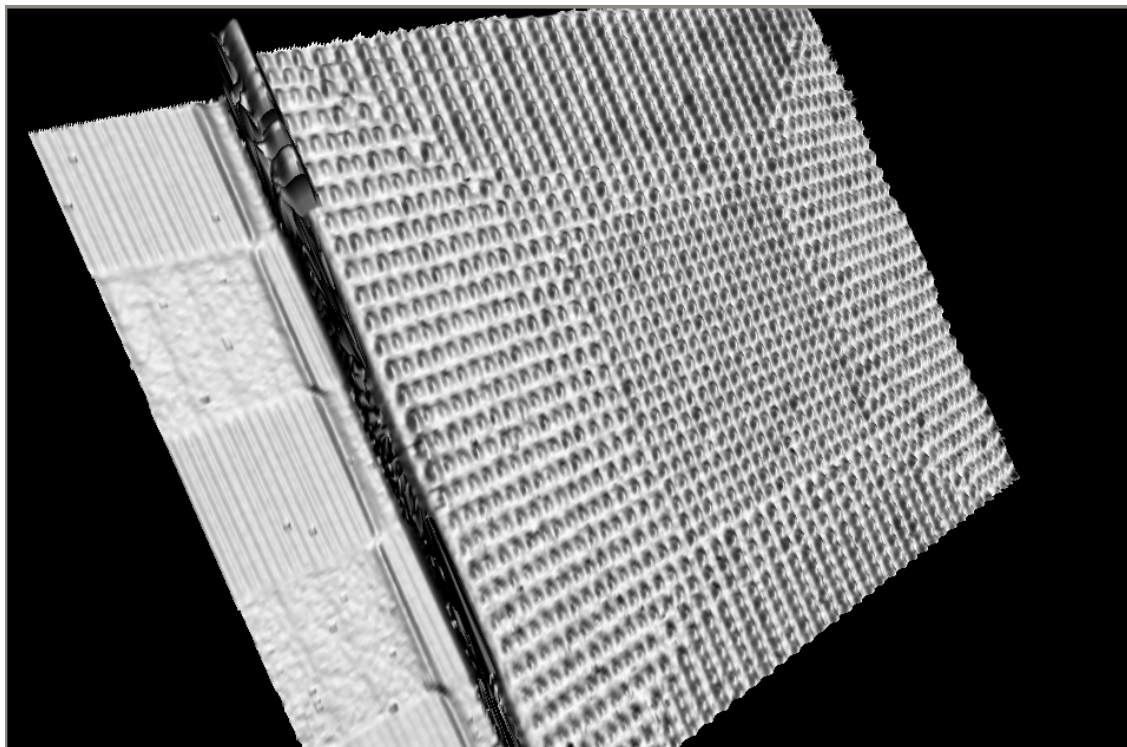


Figura 6.16 Maya 3D de la parte posterior del microchip mostrado en la Figura 6.7

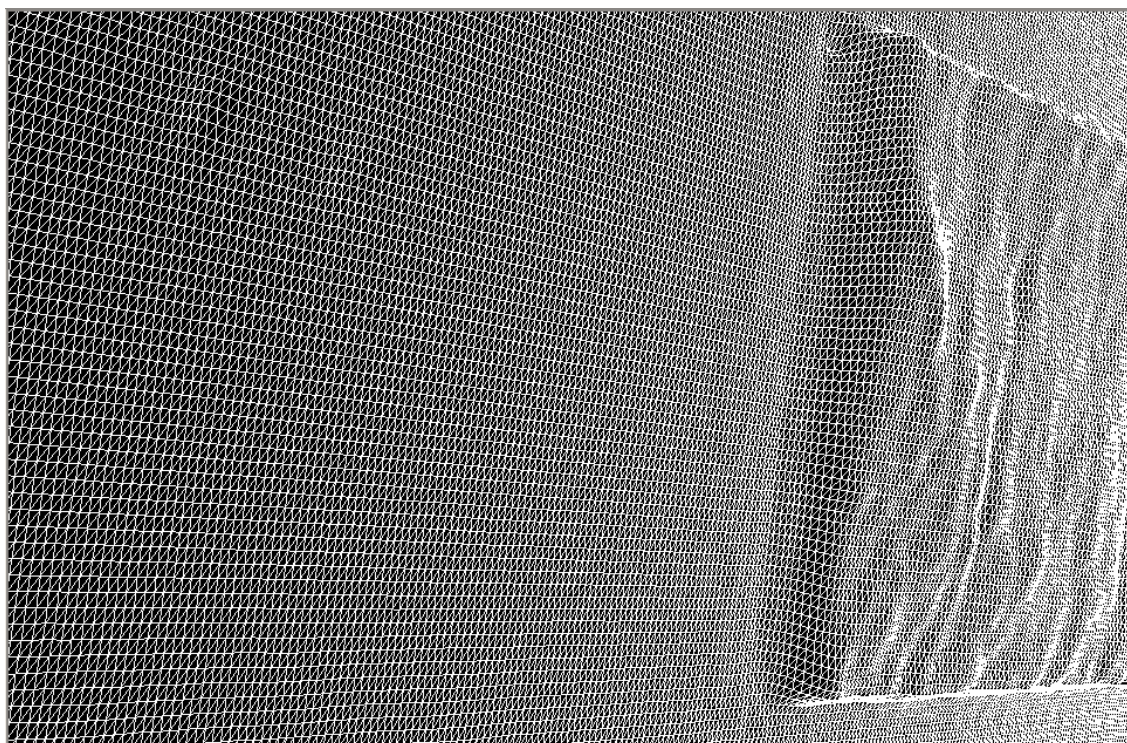


Figura 6.17 Detalle del escalón de 1mm mostrado en la Figura 6.15

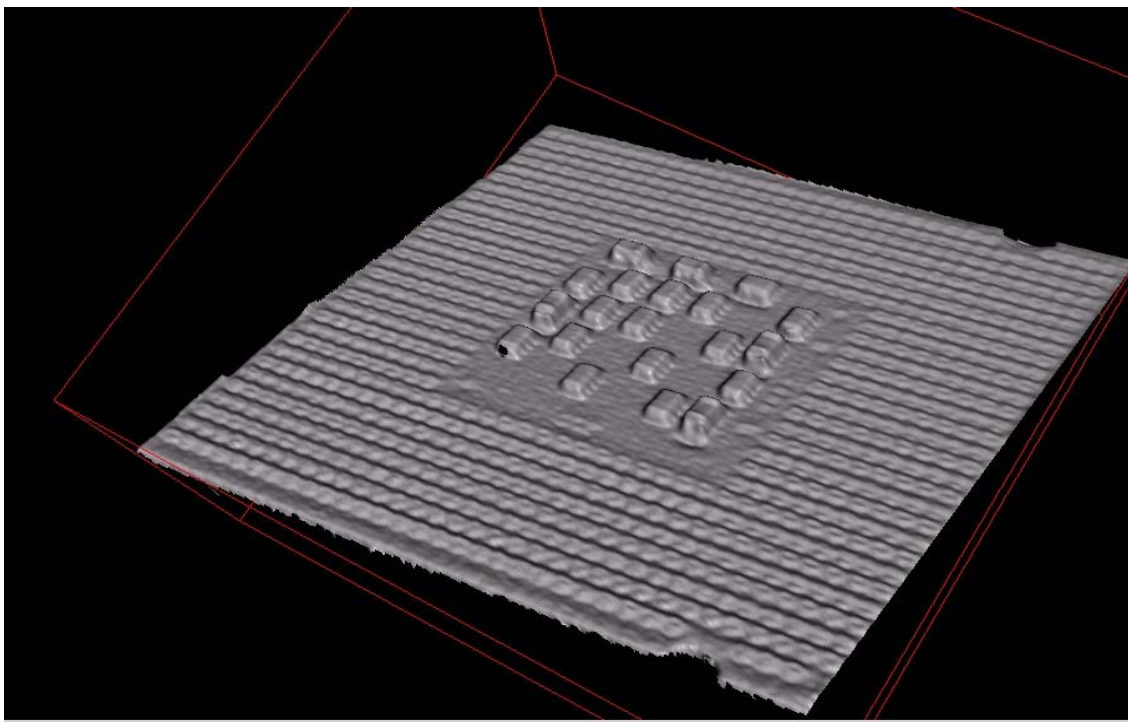


Figura 6.18 Medida 3D de un microchip mediante el método propuesto

6.4 Conclusiones

En este capítulo se ha propuesto un método para la medida de superficies no cooperativas mediante un sistema 3D formado por una cámara y un proyector. Este método se ha aplicado con éxito a la medida 3D de microchips. La técnica propuesta tiene importantes avances respecto a los métodos basados en contacto. En primer lugar el tiempo de medida se reduce considerablemente, de esta forma el método propuesto puede ser usado para la inspección rápida de estos tipos de objeto en la línea de montaje. Por otra parte, la técnica propuesta permite obtener una medida más densa que usando métodos de contacto. El trabajo mostrado en este capítulo se ha realizó durante una estancia predoctoral de cuatro meses en la Universidad Católica de Lovaina (Katholieke Universiteit Leuven) en Bélgica, soportada por el programa nacional de formación de personal universitario (F.P.U) y bajo una colaboración con la empresa de producción de microchips ICos Vision Systems. El trabajo presentado en este capítulo ha dado lugar a una publicación referenciada [VKQG 08]

Capítulo 7

Conclusiones

“Una conclusión es el punto en el que te cansaste de pensar”

Arthur Bloch

“Nada que se consiga sin pena y sin trabajo es
verdaderamente valioso”

Joseph Addison

El presente trabajo se ha desarrollado en el marco de una beca predoctoral F.P.U (Formación de Personal Universitario) obtenida por el aspirante al título de doctor tras un concurso de méritos a nivel nacional. Esta beca fue financiada por el Ministerio de Educación y Ciencia y ha sido desarrollada en el Departamento de Óptica de la UCM. Los objetivos de la tesis doctoral a los que se comprometió el becario al recibir la ayuda han sido expuestos en el Capítulo 1, apartado 1.3. Seguidamente por claridad se vuelven a exponer estos objetivos indicándose las aportaciones del trabajo expuesto en esta memoria de tesis doctoral.

- I. Nuevas técnicas de medida multiresolución. Muchos objetos técnicos tienen tamaños grandes a la vez que presentan un nivel de detalle elevado [SNS 04][Kayser 04]. Un ejemplo típico es la detección de defectos superficiales en planchas de materiales compuestos de interés aeronáutico. Dado que el error relativo es constante, lo normal es que no se pueda realizar simultáneamente la medida de la forma global, así como de los pequeños defectos superficiales que puedan estar presentes. Por lo tanto el desarrollo de técnicas para la medida con multiresolución que permitan la integración de información global con información local trabajando a

varias resoluciones, ángulos de vergencia y valores de focal es un objetivo muy interesante en metrología óptica 3D.

- II. Nuevos métodos de autoreferenciado. Cuando se mide un objeto a multiresolución es habitual que la cabeza sensora tenga que moverse en el espacio. Para mantener un marco global de referencia respecto del cual se pueda componer todas las medidas 3D obtenidas, es necesario el desarrollo de técnicas de autoreferenciado, basadas en sistemas externos o internos que permitan la determinación precisa de los movimientos 3D de la cabeza sensora [Li 03][Lu 03].
- III. Nuevos métodos para la medida mediante triangulación activa en superficies no-cooperativas. Para solucionar los problemas asociados con la variación de la reflectividad sobre el objeto a medir, en triangulación activa es necesario el desarrollo de nuevas técnicas que permitan la compensación de las variaciones de la irradiancia reflejada [Nayar 03][Caspi 98][Grossberg 04].
- IV. Nuevos métodos de calibración para un sistema de triangulación activa. Los métodos existentes —método directo y método basado en modelo— poseen problemas intrínsecos. Los métodos directos son las técnicas de calibración más precisas pero no son adecuadas para la medida de grandes superficies, que puede ser interesante para inspeccionar grandes planchas aeronáuticas [Brenner 98][Liu 03]

En relación con el objetivo I, el trabajo expuesto presenta dos técnicas novedosas de multiresolución en los Capítulos 4 y 5.

En el Capítulo 4 se muestra una técnica local de multiresolución que permite obtener una medida 3D de un objeto extenso con alta resolución en profundidad. El método presentado en este capítulo no requiere el uso de optimizaciones no lineales así como de procesos de recalibración o registro de vistas. De esta forma el método propuesto es muy flexible y rápido. Los resultados experimentales mostrados en el Capítulo 4 exponen un decrecimiento de aproximadamente un orden de magnitud en los errores de recuperación de la coordenada de profundidad.

En el Capítulo 5 se presenta una técnica global de multiresolución que al igual que el método propuesto en el Capítulo 4 permite obtener una medida 3D de un objeto extenso con alta resolución en profundidad y sin necesidad de realizar procesos de registro de vistas. Este método introduce dos avances significativos respecto al método presentado en el Capítulo 4. En primer lugar es un método que recalibra el sistema globalmente obteniendo sus nuevos parámetros y no de forma local. Por otra parte, no requiere que el objeto sea localmente plano, restricción necesaria en el método expuesto en el Capítulo 4. Los resultados experimentales expuestos en el Capítulo 5 muestran una mejora en la resolución de profundidad de aproximadamente un orden de magnitud.

En relación con el objetivo II, el método presentado en el Capítulo 5 expone un método novedoso de autocalibración que permite recalibrar el sistema cuando la cámara o el proyector cambian sus parámetros intrínsecos y/o extrínsecos. De esta forma, partiendo de una configuración calibrada, la cámara o del proyector pueden moverse con total libertad

En relación con el objetivo III, se ha presentado en el Capítulo 6 un método novedoso para la medida 3D de superficies no cooperantes mediante triangulación activa. Este método se ha aplicado con éxito a la inspección de microchips. La técnica propuesta tiene importantes avances respecto a los métodos basados en contacto. En primer lugar, el tiempo de medida se reduce considerablemente; de esta forma, este método puede ser usado para la inspección rápida de estos tipos de objeto en la línea de montaje. Por otra parte, la técnica propuesta permite obtener una medida más densa que mediante el uso de CMMs. El presente trabajo se ha realizado durante una estancia predoctoral de cuatro meses en la Universidad Católica de Lovaina (Katholieke Universiteit Leuven) bajo una colaboración con la empresa ICos Vision Systems.

Finalmente en relación con el objetivo IV, se ha presentado en el Capítulo III un método novedoso de calibración mixto para un sistema de triangulación activa. Esta técnica de calibración es más flexible y manejable que el método de calibración directo debido a que, por una parte no es necesario usar precisos posicionadores lineales y por otra puede ser usada fuera del volumen calibrado. Por otra parte, el método propuesto no necesita modelar el proyector como una

cámara inversa o realizar explícitamente la calibración del sistema de triangulación mediante la determinación de la matriz de roto-traslación. La técnica propuesta de calibración puede ser usada cuando se está interesado en medir objetos extensos.

El trabajo expuesto en esta memoria de tesis ha dado lugar a cuatro publicaciones referenciadas [Vargas 07][Vargas 08][Vargas 09][VKQG 08] y una publicación sin referenciar [VQ 08]. Por otra parte, durante su tiempo de formación el aspirante al título de doctor realizó una estancia predoctoral de cuatro meses, financiada por el programa nacional de formación de personal universitario (F.P.U) a la Universidad Católica de Lovaina (Bélgica) (Katholieke Universiteit Leuven).

Capítulo 8

Trabajo Futuro

“Cualquier solución entraña nuevos problemas”

Arthur Bloch

“El futuro tiene muchos nombres: para el débil es lo inalcanzable para el miedoso, lo desconocido. Para el valiente, la oportunidad”

Víctor Hugo

La memoria de tesis doctoral presentada abre nuevas líneas de investigación que se detallan seguidamente.

8.1 Nuevo método de calibración para un sistema de triangulación activa

En el Capítulo 3 se ha presentado un método novedoso para la calibración de un sistema de triangulación activa. Este método supera algunos de los inconvenientes de los métodos estándares de calibración, como la necesidad de usar precisos posicionadores lineales, la restricción de poder medir únicamente dentro del volumen que se ha calibrado en los métodos directos o la peor precisión obtenida en los métodos basados en modelo frente a los directos. No obstante, los errores de calibración asociados al método mixto propuesto son mayores que en el caso de usar un método directo, como se puede observar a partir de la Tabla 3.4.

En el Capítulo 3 se ha obtenido la expresión analítica que relaciona la coordenada de profundidad respecto a un sistema de referencia arbitrario del

mundo (Z_w) con la fase absoluta proyectada (Φ_x) a través de los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara y el proyector, expresión (3.12). Expresiones similares se pueden obtener para relacionar las coordenadas laterales X_w y Y_w con la fase absoluta proyectada Φ_x . A partir de estas expresiones es posible desarrollar un nuevo método de calibración que por una parte comparta todas las ventajas en relación al método mixto propuesto y simultáneamente posea la precisión de los métodos polinomiales. El nuevo método estaría basado en realizar un ajuste de la expresión (3.12) para la coordenada de profundidad respecto con la fase absoluta, así como de las correspondientes expresiones que relacionan las coordenadas laterales con la fase en cada píxel al observar un plano de calibración en posiciones desconocidas de una forma similar a la expuesta en el apartado 3.3.1. Una vez realizados los ajustes se obtendría los valores de $a_C(m_{C,i}^\alpha)$, $b_C(m_{C,i}^\alpha)$, $c_C(m_{C,i}^\alpha)$, $a_{1P}(v_P)$, $a_{2P}(v_P)$, $c_{1P}(v_P)$, c_{2P} , $b_{1P}(v_P)$ y $b_{2P}(v_P)$ en cada píxel. Utilizando las relaciones que existen de estos parámetros con los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara y el proyector (expuestas en el apartado 3.3.1) se puede obtener un sistema sobredeterminado que nos permita calcular los parámetros de calibración del sistema de medida.

8.2 Nuevo método de multiresolución mediante dos cámaras y un proyector

En el Capítulo 5 se ha presentado un método de multiresolución basado en autocalibrar dinámicamente el sistema de triangulación activa formado por una cámara y un proyector. El método de autocalibración posee la limitación que no puede recalibrar el sistema cuando se modifican los parámetros de la cámara y el proyector simultáneamente. Se puede resolver esta limitación de forma muy sencilla introduciendo una cámara adicional en el sistema de triangulación. De esta forma, el sistema de medida 3D estaría formado por dos cámaras y un proyector. El procedimiento consistiría en realizar previamente una calibración del sistema de medida obteniéndose los parámetros intrínsecos y extrínsecos de las cámaras y el proyector. La medida 3D se obtendría a partir de las

correspondencias entre las cámaras, que se adquirirían de forma automática mediante la proyección de una fase absoluta con el proyector. La medida 3D se puede referir respecto al proyector gracias a los parámetros extrínsecos conocidos de las cámaras y el proyector.

La nueva técnica de multiresolución consistiría en obtener inicialmente una medida 3D de toda la superficie mediante las dos cámaras previamente calibradas. Seguidamente ambas cámaras se modifican cambiando sus parámetros intrínsecos y/o extrínsecos. Mediante el método expuesto en (5.2) las cámaras se recalibrarían al referir la medida 3D previa respecto al proyector que no se ha modificado en todo el proceso. Obsérvese que mediante esta nueva técnica se eliminaría un paso del método expuesto en 5.2 (Caso 1 ó Caso 2) con el consiguiente ahorro de tiempo en la medida en multiresolución.

8.3 Nuevo método de codificación mediante proyección de patrones

A lo largo de este trabajo se ha requerido en numerosas ocasiones la proyección de dos fases absolutas (Φ_x y Φ_y) para la codificación univoca de capa punto del objeto a medir. Para obtener una fase absoluta mediante el método GC+PS es necesario proyectar y procesar típicamente 9 patrones (dos de referencia, tres para la codificación con tres bits mediante GC y cuatro para el PS). Por tanto, si se proyectan dos fases absolutas es necesario proyectar y decodificar típicamente 18 patrones. Esto es un inconveniente desde el punto de vista del tiempo de medida y de procesado. Para resolver esta problemática se podría utilizar un nuevo método de codificación.

El método típico de codificación mediante cuatro pasos con Phase-Shifting consiste en enviar al proyector los siguientes patrones,

$$I_{x,i}(m_P) = B \cos \left[\frac{2\pi}{T_x} u_P - i \frac{\pi}{2} \right] \quad (8.1)$$

$$I_{y,i}(m_p) = B \cos \left[\frac{2\pi}{T_y} v_p - i \frac{\pi}{2} \right] \quad (8.2)$$

donde, $i = [0,1,2,3]$, T_x y T_y son la anchura en píxeles de las franjas y B es la modulación, que para un proyector típico corresponde a 255 niveles de gris.

El nuevo método a implementar correspondería en proyectar los siguientes cuatro patrones,

$$I_i(m_p) = B \cos \left[R(u_p, v_p) - i \frac{\pi}{2} \right] \quad (8.3)$$

donde $R(u_p, v_p)$ es una función que genera valores pseudo-aleatorios con una distribución con media igual a π radianes, desviación típica igual a π radianes.

Mediante estos patrones se podría obtener una fase módulo 2π mediante el método habitual PS con la resolución y la precisión típicas de este método. La fase absoluta podría obtenerse directamente de la fase módulo 2π y los patrones proyectados (8.3) y capturados mediante la cámara sin necesidad de proyectar un GC. El método estaría basado en utilizar una técnica similar a DIC explicada en el Capítulo 2 con la finalidad de obtener un código único para cada píxel de la fase módulo 2π y de esta forma obtener la fase absoluta. Mediante esta nueva técnica de codificación se reduciría de forma drástica el número de patrones a proyectar y decodificar, pudiéndose obtener una codificación absoluta mediante la proyección de un único patrón en el caso de usarse color. El inconveniente principal podría encontrarse en el mayor tiempo de procesado que sería necesario.

8.4 Nuevo método para la medida de superficies no cooperativas

En el Capítulo 6 se ha presentado un método novedoso para la medida de superficies no cooperativas. Este método permite eliminar la no-linealidad introducida por la cámara, lo que reduce los errores en la recuperación de las

coordenadas tridimensionales. En el método propuesto en el Capítulo 6 se ha desestimado eliminar la no-linealidad del proyector debido al gran número de patrones que serían necesarios proyectar y decodificar para realizar tal proceso. Utilizando el nuevo método de codificación esbozado en el apartado 8.3 sería factible realizar un nuevo método de medida de superficies no cooperativas que eliminara la no-linealidad introducida por el proyector, incrementándose la precisión de las medidas 3D.

Apéndice I

Librería de triangulación activa “ScanningLib”

“La paciencia es un árbol de raíz amarga pero de frutos muy
dulces”

Proverbio Persa

“El modo de dar una vez en el clavo es dar cien veces en la
herradura”

Miguel de Unamuno

Este apéndice presenta la librería de medida 3D “ScanningLib”

AI.1 Introducción:

AI.1.1 ¿Qué es “ScanningLib”?

ScanningLib es una librería de medida 3D mediante triangulación activa para MATLAB®, .NET y ambientes Win32.

Para el usuario de MATLAB® ScanningLib consiste en una *toolbox* de funciones que pueden usarse desde la línea de comandos de MATLAB® o incluidas en funciones o *scripts*.

Para el desarrollador en .NET ScanningLib es un ensamblaje .NET que una vez incluido como una referencia en un proyecto permite al usuario el uso de toda su funcionalidad.

Para el desarrollador en Win32 ScanningLib es una librería C/C++ que puede ser incluida en cualquier proyecto Win32 C/C++.

AI.1.2 Motivación y Objetivos

La motivación y objetivos de esta librería de triangulación activa son

Facilidad de uso: ScanningLib está pensada para ser utilizada de forma sencilla por cualquier usuario sin necesidad de que sea un experto en visión por ordenador ni en procesamiento de franjas. La librería está preparada para que cualquier desarrollador de C/C++ o aplicaciones .NET pueda extender la funcionalidad de ScanningLib para adaptarla a sus propias necesidades. Por otra parte se ha puesto mucho hincapié en la documentación de la librería.

Flexibilidad: Uno de los principales inconvenientes del software existente para la obtención de información 3D es que en su mayoría están únicamente preparados para ser usados con un determinado hardware, es decir mediante un determinado modelo de cámara y proyector. ScanningLib está preparada para ser usada con cualquier modelo de cámara que soporte los estándares WDM de Microsoft y con cualquier proyector que sea reconocido por la API de Windows.

Programación Defensiva: Para el correcto desarrollo de software fiable y perfectamente documentado es necesario testear mediante pruebas unitarias cada método y propiedad de los distintos objeto. ScanningLib ha sido desarrollada siguiendo los estándares de programación defensiva expuestos en [Gunderloy 04][Gunderloy 05]

AI.1.3 Ventajas de ScanningLib

Interoperabilidad: ScanningLib está preparada para ser utilizada de forma inmediata desde MATLAB, cualquier lenguaje .NET (Visual Basic .NET, Visual C++ .NET, Visual C# .NET Visual J# .NET) o como una librería C/C++.

Flexibilidad: ScanningLib está preparada para usar cualquier tipo de cámara cuyos drivers respeten los estándares WDM de Microsoft (*Windows Driver*

Model). De esta forma el módulo de control del dispositivo de imagen puede utilizar y controlar prácticamente cualquier cámara multimedia sin cambiar ni una línea de código.

Alto rendimiento y robustez: Los métodos de ScanningLib están fundamentados a bajo nivel en los métodos y tipos de la librería de C++ OpenCV de Intel©. Esta librería de procesamiento de imagen es una de las más rápidas y robustas que existen, siendo su comunidad de usuarios y desarrolladores de las más numerosas del planeta.

Facilidad de uso: Todos los métodos y objetos de ScanningLib están totalmente documentados.

AI.2 Estructura de “ScanningLib”

Seguidamente se van a explicar los distintos objetos que componen ScanningLib, así como la estructura y el flujo de su interfaz gráfico para MATLAB

AI.2.1 Estructura de objetos de ScanningLib

La librería de triangulación activa ScanningLib está desarrollada siguiendo las pautas de la programación orientada a objetos. Seguidamente se proporciona una descripción de los distintos objetos que componen la librería así como de sus métodos y propiedades. La Figura AI.1 muestra un diagrama de los distintos objetos así como de sus métodos.



Figura AI.1 Diagrama de los distintos objetos que constituyen ScanningLib

PROJECTOR:

Este objeto se encarga de controlar a un proyector de luz conectado al equipo. Los métodos que tiene asociado son:

- *AddFrame*: Añade una imagen a la colección de imágenes almacenadas en un buffer interno del objeto PROJECTOR que se desean proyectar
- *Close*: Efectúa todas las operaciones necesarias para borrar el objeto PROJECTOR de la memoria.
- *DispProj*: Proyecta todas las imágenes de la colección almacenadas. Se proyecta inicialmente la primera imagen que fue almacenada y todas las demás ordenadamente.
- *Init*: Realiza todas las operaciones de configuración necesarias para inicializar el objeto proyector.
- *Shot*: Proyecta una imagen concreta etiquetada con un número entero que corresponde al índice de la imagen en la colección.

La forma ordenada adecuada de usar el proyector se muestra en la Figura AI.2

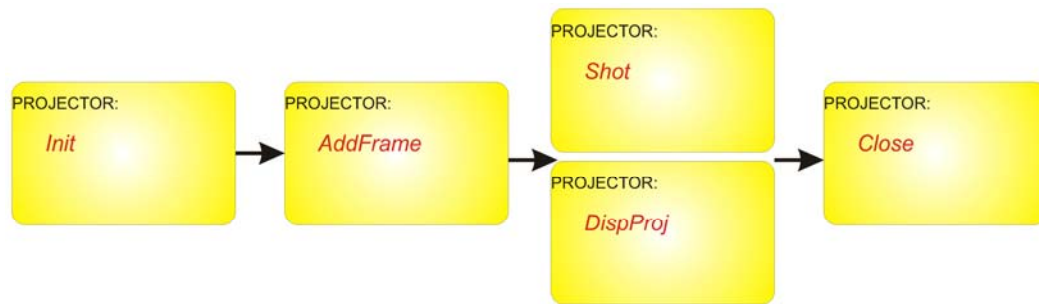


Figura AI.2 Esquema que muestra la forma adecuada de llamar a los métodos del objeto *PROJECTOR*

Como se observa en la Figura AI.2 para el correcto uso del proyector inicialmente hay que llamar al método “*Init*” que realiza todas las operaciones de configuración necesarias. Seguidamente es necesario cargar las imágenes que se desean proyectar en un buffer interno del objeto *PROJECTOR*, para esto se llama al método “*AddFrame*”. Seguidamente se realiza la proyección de las imágenes; proyectando una de ellas (método “*Shot*”) o bien proyectándolas todas de forma ordenada (método “*DispProj*”). Finalmente es necesario borrar el objeto proyector de forma adecuada, esto se realiza mediante el método “*Close*”

CAMERA:

Este objeto se encarga de controlar cualquier tipo de cámara cuyos drivers cumplan los estándares WDM de Microsoft. Los métodos que tiene asociado este objeto son:

- *CamWdmMatInit*: Realiza todas las operaciones de configuración necesarias para inicializar el objeto *CAMERA*.
- *CamWdmMatClose*: Efectúa todas las operaciones necesarias para borrar el objeto *CAMERA* de la memoria.
- *CamWdmMatShot*: Adquiere una imagen mediante el objeto *CAMERA*.
- *Properties*: Conjunto de propiedades del objeto *CAMERA*. Seguidamente se proporciona todo el conjunto de propiedades del objeto:

Conjunto de propiedades que preguntan el estado actual del objeto

CamWdmMatGetBrightness

CamWdmMatGetContrast

CamWdmMatGetExposure

CamWdmMatGetGain

CamWdmMatGetGamma

CamWdmMatGetHue

CamWdmMatGetIris

CamWdmMatGetWhiteBalance

CamWdmMatGetZoom

CamWdmMatGetFocus

CamWdmMatGetSaturation

CamWdmMatGetSharpness

CamWdmMatGetFrameRate

Conjunto de propiedades que fijan el estado de la cámara

CamWdmMatSetBrightness

CamWdmMatSetContrast

CamWdmMatSetExposure

CamWdmMatSetGain

CamWdmMatSetGamma

CamWdmMatSetHue

CamWdmMatSetIris

CamWdmMatSetWhiteBalance

CamWdmMatSetZoom

CamWdmMatSetFocus

CamWdmMatSetSaturation

CamWdmMatSetSharpness

CamWdmMatSetFrameRate

Conjunto de propiedades que interrogan el modo de operación de la cámara

CamWdmMatGetBrightnessMode

CamWdmMatGetContrastMode

CamWdmMatGetExposureMode

CamWdmMatGetGainMode

CamWdmMatGetGammaMode

CamWdmMatGetHueMode

CamWdmMatGetIrisMode

CamWdmMatGetWhiteBalanceMode

CamWdmMatGetZoomMode

CamWdmMatGetFocusMode

CamWdmMatGetSaturationMode

CamWdmMatGetSharpnessMode

Conjunto de propiedades que fijan el modo de operación de la cámara

CamWdmMatSetBrightnessMode

CamWdmMatSetContrastMode

CamWdmMatSetExposureMode

CamWdmMatSetGainMode

CamWdmMatSetGammaMode

CamWdmMatSetHueMode

CamWdmMatSetIrisMode

CamWdmMatSetWhiteBalanceMode

CamWdmMatSetZoomMode

CamWdmMatSetFocusMode

CamWdmMatSetSaturationMode

CamWdmMatSetSharpnessMode

La forma lógica de utilizar el objeto CAMERA viene especificada en la Figura AI.3

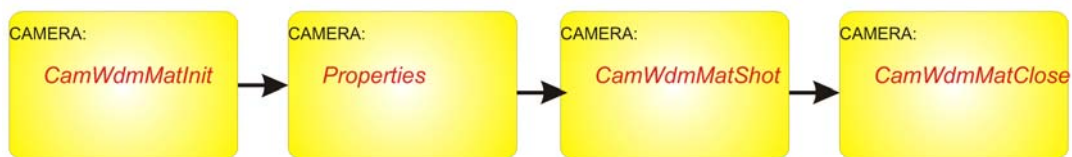


Figura AI.3 Esquema que muestra la forma lógica de llamar a los métodos del objeto CAMERA

Como se puede observar en la Figura A.3, para usar el objeto CAMERA inicialmente es necesario inicializarla para lo que se usa el método *CamWdmMatInit*, seguidamente se ajustan las propiedades para obtener una

imagen o conjunto de imágenes (*CamWdmMatShot*). Finalmente el objeto CAMERA se borra de la memoria mediante el método *CamWdmMatClose*.

PROJECTORCALIBRATOR:

Este objeto se encarga de realizar la calibración del objeto PROJECTOR. El método que tiene asociado este objeto es:

- *CalcCalibration*: Realiza la calibración del proyector mediante el método de Zhang [Zhang 99]

CAMERACALIBRATOR:

Este objeto se encarga de realizar la calibración del objeto CÁMERA. Los métodos que tiene asociado este objeto son:

- *CalcCalibration*: Realiza la calibración del proyector mediante el método de Zhang [Zhang 99]
- *FindCorners*: Realiza el proceso de extracción de esquinas para los distintos planos de calibración.

PSGCX:

Este objeto se encarga de generar y decodificar los patrones de Gray-Code y Phase-Shifting. En este caso, la codificación solo se produce en el eje X de la imagen. Los métodos que tiene asociado este objeto son:

- *GenPattern*: Este método genera una colección de imágenes con los distintos patrones de Gray-Code y Phase-Shifting paralelos al eje X. Estas imágenes se deben pasar al objeto PROJECTOR para que sean proyectadas
- *DecodePattern*: Este método decodifica un conjunto de imágenes de Gray-Code y Phase-Shifting paralelos al eje X, obteniéndose una fase absoluta.

PSGCXY:

Este objeto se encarga de generar y decodificar los patrones de Gray-Code y Phase-Shifting.

En este caso, la codificación se produce en el eje X e Y de la imagen. Los métodos que tiene asociado este objeto son:

- *GenPattern:* Este método genera una colección de imágenes con los distintos patrones de Gray-Code y Phase-Shifting paralelos al eje X e Y . Estas imágenes se deben pasar al objeto PROJECTOR para que sean proyectadas
- *DecodePattern:* Este método decodifica un conjunto de imágenes de Gray-Code y Phase-Shifting paralelos al eje X e Y , obteniéndose sendas fases absolutas, una paralela al eje X y otra paralela al eje Y del proyector.

STEREO:

Este objeto se encarga de realizar las tareas relativas al sistema estéreo. Los métodos que tiene asociado este objeto son:

- *CalcCalibrationStereo:* Realiza la calibración del sistema estéreo formado por la cámara y el proyector.
- *Triangulation:* Realiza el proceso de triangulación a partir de las calibraciones previas y de la fase absoluta medida para el objeto que se desea inspeccionar.

AI.2.2 Uso Lógico de los objetos de “ScanningLib”

Seguidamente se proporciona la forma lógica de usar los objetos de “ScanningLib” con la finalidad de obtener una medida 3D mediante triangulación activa. En la Figura AI.4 se proporciona un esquema del flujo de datos para el proceso de calibración

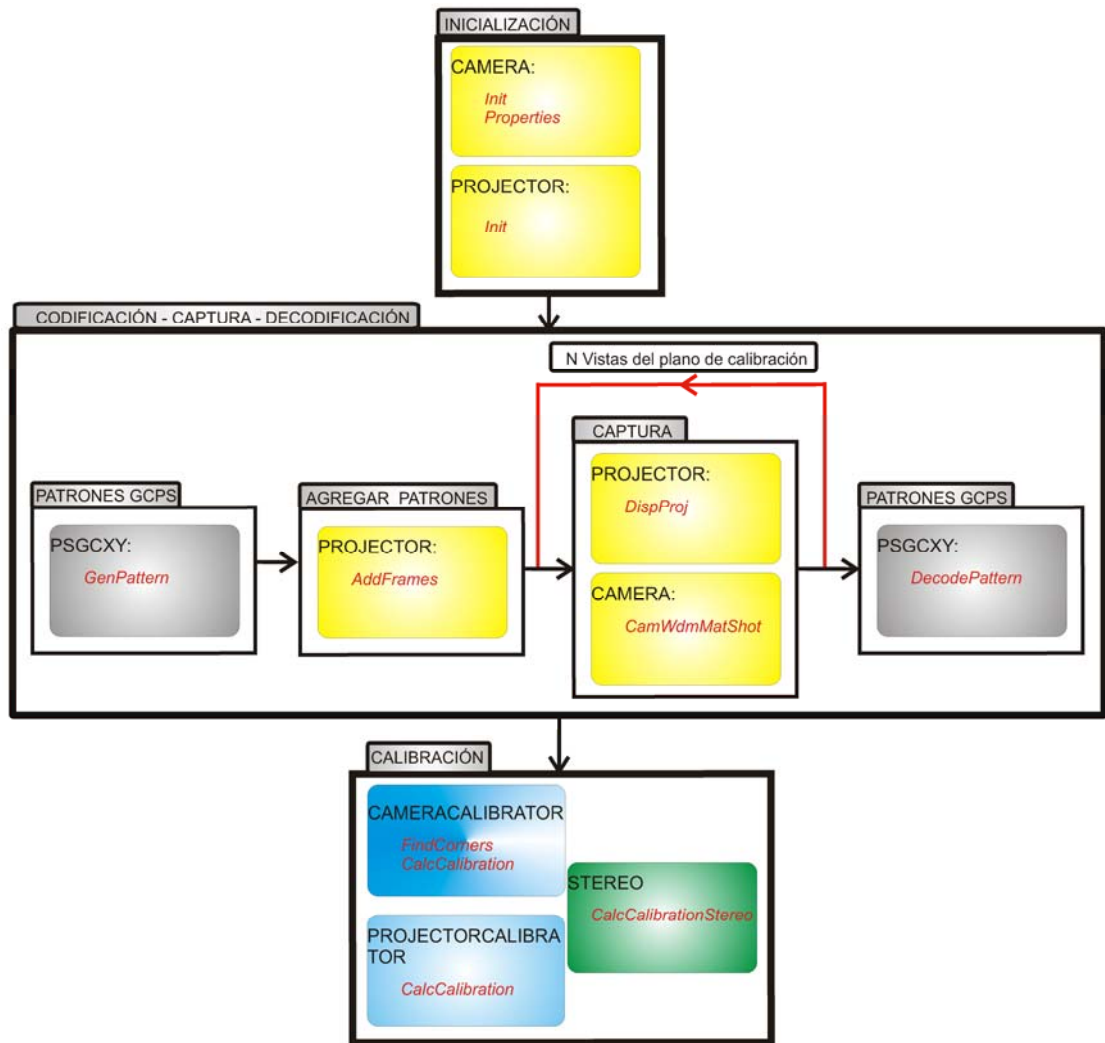


Figura AI.4 Flujo de datos para el proceso de calibración mediante “ScanningLib”

Como se observa de la Figura AI.4 inicialmente es necesario inicializar los objetos CAMERA y PROJECTOR para configurarlos para su uso posterior; seguidamente se generan los patrones PSGC. Estos patrones se almacenan en el objeto PROJECTOR para que sean seguidamente proyectados; sus imágenes deformadas por el objeto de calibración son adquiridas por el objeto CAMERA. Este proceso se realiza N veces, con $N > 3$. Una vez obtenidas estas imágenes se procede a calibrar el sistema. Con esta finalidad se calibra la cámara mediante CAMERACALIBRATOR, el proyector mediante PROJECTORCALIBRATOR y finalmente el sistema de estéreo (STEREO).

En la Figura AI.5 se muestra el flujo de datos para una medida 3D de un objeto arbitrario.

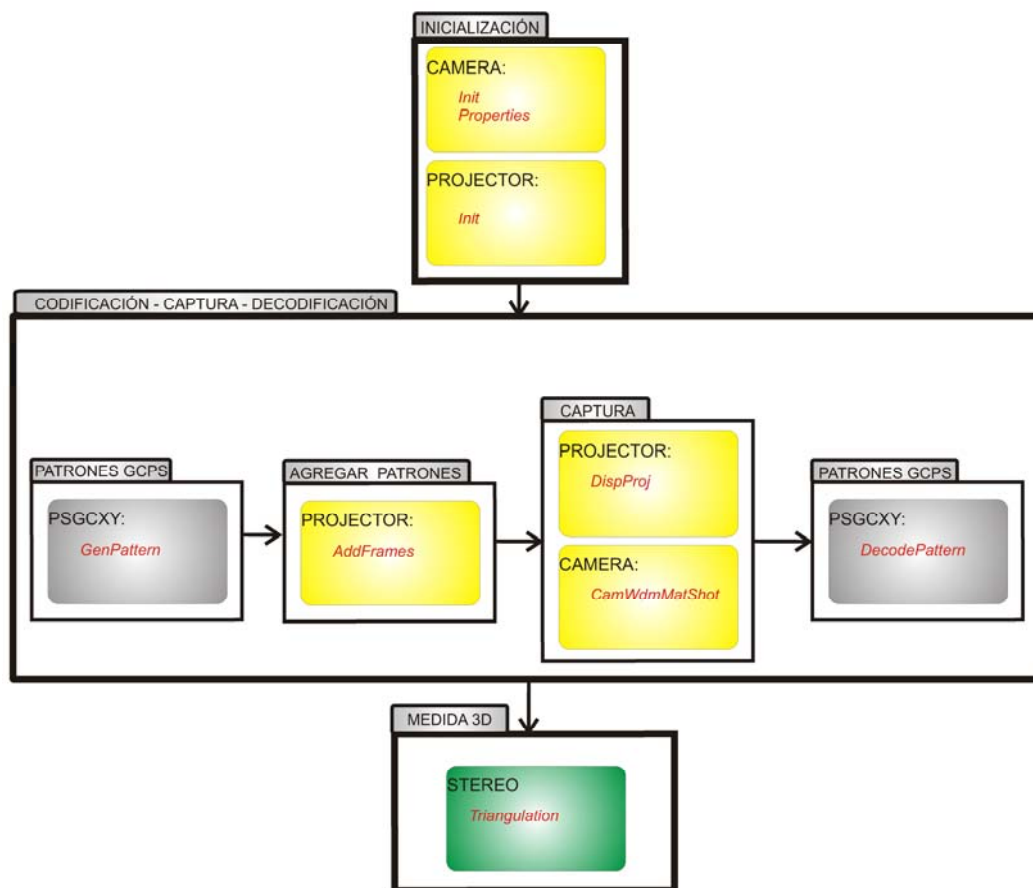


Figura AI.5 Flujo de datos para el proceso de medida mediante “ScanningLib”

Como se aprecia en la Figura AI.5 el proceso de medida es inicialmente idéntico al proceso de calibración. La diferencia aparece a partir del proceso de proyección y captura de los patrones GCPS, donde en el caso de medida se realiza una única vez. Seguidamente utilizando la calibración previa del sistema se obtiene una medida mediante la triangulación de la fase absoluta.

AI.2.3 Interfaz gráfico de ScanningLib para MATLAB®

El software para medida 3D mediante triangulación activa “ScanningLib” posee un conjunto de GUIs (*Grafical User Interfaces*) para su uso desde MATLAB®. De esta forma cualquier usuario puede utilizar toda la funcionalidad de “ScanningLib” sin estar familiarizado con el uso de MATLAB®. Existen tres GUIs para utilizar “ScanningLib” que se llaman CAMERA, CALIB y MEASURE. La GUI CAMERA se encarga de las labores de inicialización,

control y manejo de la cámara. CALIB realiza el proceso de calibración de la cámara, proyector y sistema en estéreo y finalmente MEASURE se encarga de realizar una medida 3D. Seguidamente se muestran imágenes de las distintas GUIs

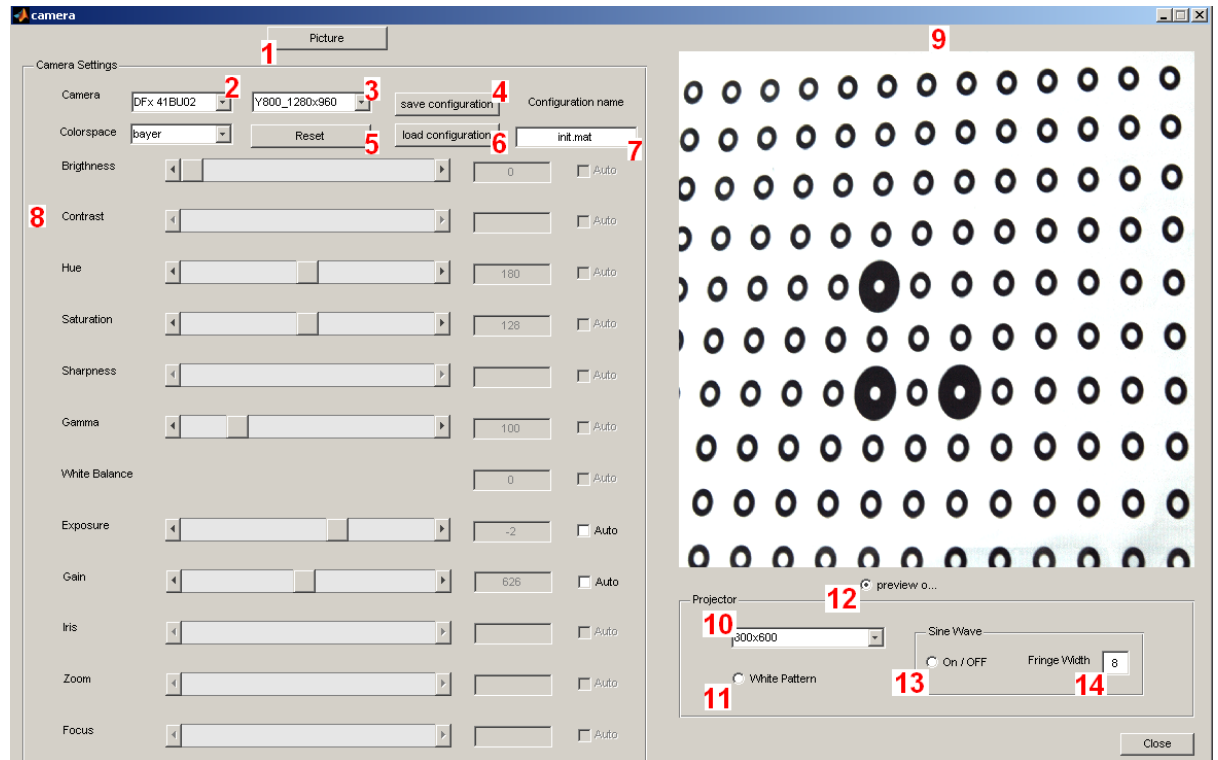


Figura A1.6 Interfaz gráfico para la configuración de la cámara mediante “ScanningLib”

En la Figura A.6 se muestra el interfaz gráfico que se encarga del manejo y configuración de la cámara. Esta ventana posee numerosos botones y objetos que se pasan a explicar seguidamente:

- 1 Este botón obtiene una imagen y la muestra por pantalla.
- 2 Esta lista muestra todas las cámaras conectadas al PC y permite seleccionar una de ellas.
- 3 Esta lista muestra todas las configuraciones de imagen disponibles por el dispositivo elegido y permite seleccionar una de ellas.
- 4 Este botón salva la configuración y propiedades de la cámara en disco con el nombre de archivo especificado en 7.

- **5** Este botón resetea las propiedades y configuración de la cámara seleccionada y vuelve a su configuración por defecto.
- **6** Este botón carga la configuración y propiedades de la cámara a partir de un archivo de configuración guardado en disco y con nombre especificado en **7**
- **7** Nombre del archivo de configuración de la cámara. Se usa para almacenar y leer la configuración de cámara deseada.
- **8** Valor del conjunto de propiedades de la cámara
- **9** Figura en la que se muestra un preview en vivo de la cámara si está activado el botón de radio **12**
- **10** Resolución de la pantalla secundaria que se va a utilizar para proyectar patrones mediante el proyector
- **11** Botón de radio que proyecta al estar activado un patrón blanco en el escritorio secundario.
- **13** Botón de radio que proyecta al estar activado un patrón sinusoidal con un periodo dado por el valor de la caja **14**
- **14** Caja editable que fija el periodo del patrón sinusoidal a proyectar cuando está activado en botón de radio **13**.

La GUI calib se encarga del proceso de calibración del sistema cámara-proyector.

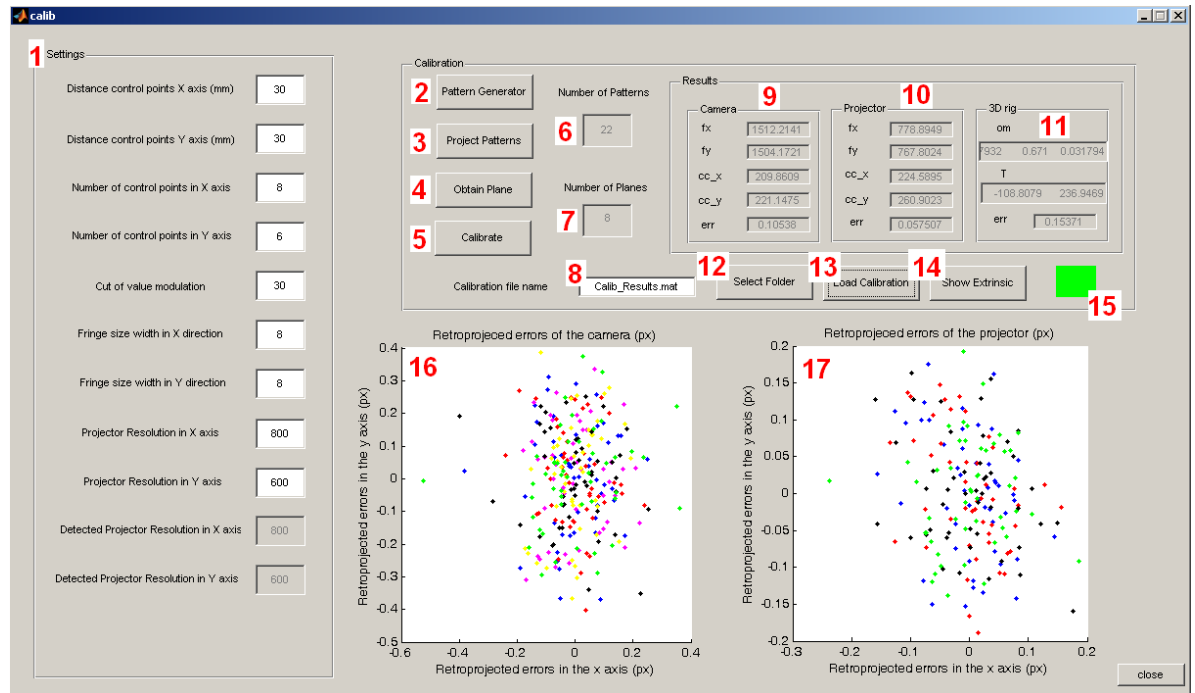


Figura AI.7 Interfaz gráfico para la calibración del sistema de triangulación activa mediante “ScanningLib”

En la Figura AI.7 se muestra el interfaz gráfico que se encarga de la calibración del sistema de triangulación activa. Esta ventana posee numerosos botones y objetos que se pasan a explicar seguidamente:

- **1** Panel mediante el cual se determinan numerosos parámetros necesarios para realizar el proceso de calibración como la distancia absoluta entre puntos de control, número de puntos de control a detectar, valor de corte en la modulación, anchura de la franja más fina proyectada o la resolución del proyector usado..
- **2** Botón mediante el cual se generan los patrones Gray-Code + Phase-Shifting usando los parámetros especificados en **1**.
- **3** Botón que se encarga de proyectar los patrones de Gray-Code + Phase-Shifting generados previamente mediante **2**.
- **4** Botón que se encarga de obtener una medida de un plano de calibración para la calibración del sistema. Cada vez que se obtiene una medida de un

plano de calibración la caja 7 se actualiza. Para la realización de una calibración es necesario tomar al menos tres medidas de un plano de calibración en diferentes configuraciones aunque se recomienda tomar unas 5 o 6.

- 5 Este botón realiza el proceso de calibración del sistema.
- 6 En esta caja se muestra el número de patrones que se tienen que proyectar y capturar cada vez que se obtiene una medida del plano de calibración.
- 7 En esta caja se muestra el número de medidas de los planos de calibración obtenidos. Para la realización de una calibración es necesario tomar al menos tres medidas de un plano de calibración en diferentes configuraciones aunque se recomienda tomar unas 5 o 6.
- 8 Nombre del fichero donde se va a almacenar el resultado de la calibración del sistema 3D.
- 9 Resultados de la calibración para la cámara.
- 10 Resultados de la calibración para el proyector.
- 11 Resultados de la calibración para el 3D rig.
- 12 Permite recorrer el árbol de directorios.
- 13 Abre el fichero de calibración antiguo.
- 14 Muestra una representación 3D del sistema de triangulación, así como de los puntos de control utilizados. En la Figura A.8 se muestra la Figura resultante que surge tras pulsar este botón.
- 15 Imagen que muestra de forma visual si la calibración ha sido satisfactorio o si debe repetirse. Si la imagen es verde, la calibración es válida, si es amarilla la calibración es válida pero no es precisa, si la imagen es roja la calibración no es válida y debe repetirse de nuevo

- **16** Representación del error de retroproyección para la cámara en cada uno de los planos usados en el proceso de calibración.
- **17** Representación del error de retroproyección para el proyector en cada uno de los planos usados en el proceso de calibración.

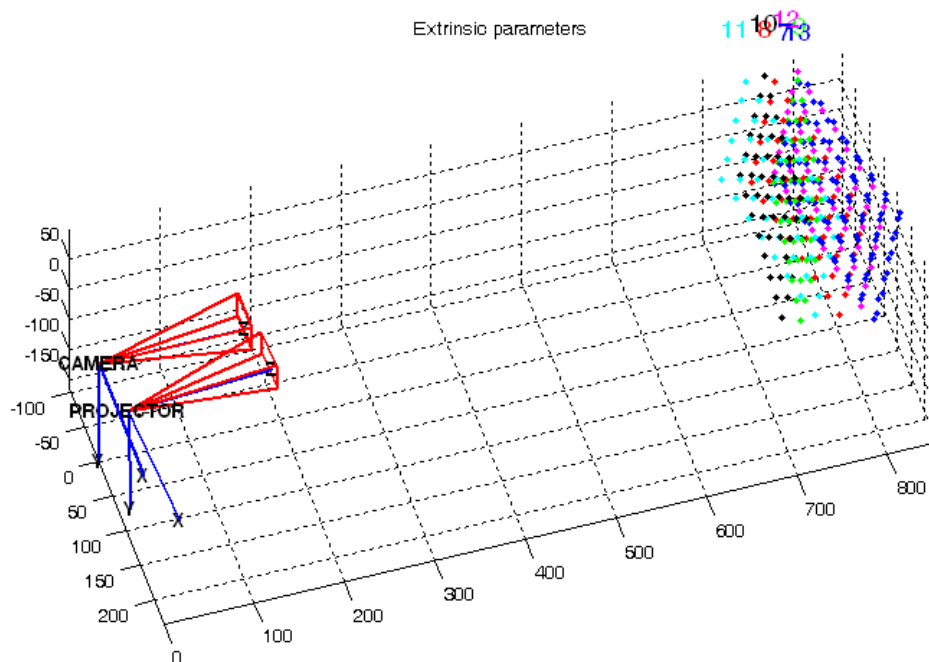


Figura A1.8 Representación de los parámetros internos y externos del sistema de triangulación así como de las coordenadas 3D de los puntos de control utilizados en el proceso de calibración. Esta imagen surge al pulsar el botón 14 tras calibrar el sistema.

Finalmente la GUI measureGUI se encarga de realizar una medida 3D tras haberse calibrado el sistema. En la Figura A.7 se muestra el interfaz gráfico que se encarga de obtener una medida 3D mediante “ScanningLib”. Esta ventana posee numerosos botones y objetos que se pasan a explicar seguidamente:

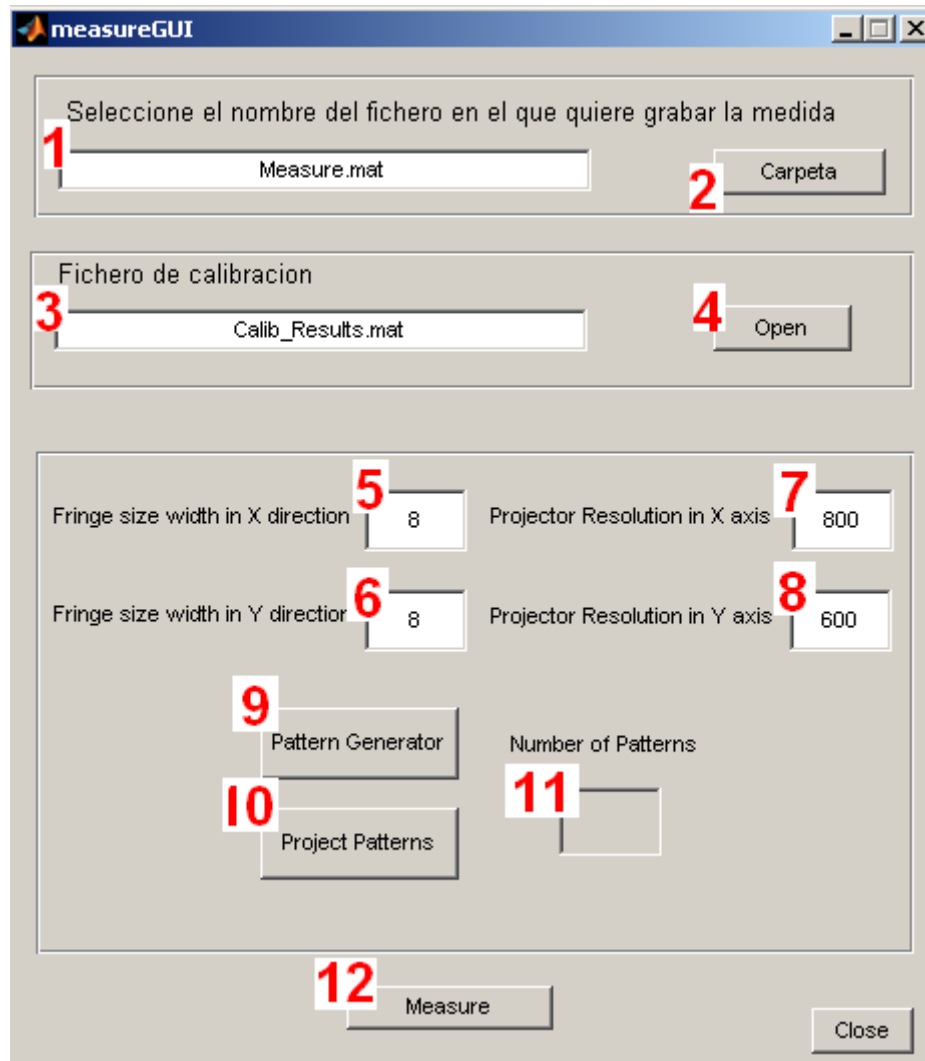


Figura A.9 Interfaz gráfico para la medida 3D mediante “ScanningLib”

- 1 Panel mediante el cual se determinan numerosos parámetros necesarios para realizar el proceso de calibración como la distancia absoluta entre puntos de control, número de puntos de control a detectar, valor de corte en la modulación, anchura de la franja más fina proyectada o la resolución del proyector usado..
- 2 Botón mediante el cual se generan los patrones Gray-Code + Phase-Shifting usando los parámetros especificados en 1.
- 3 Botón que se encarga de proyectar los patrones de Gray-Code + Phase-Shifting generados previamente mediante 2.

- **4** Botón que se encarga de obtener una medida de un plano de calibración para la calibración del sistema. Cada vez que se obtiene una medida de un plano de calibración la caja **7** se actualiza. Para la realización de una calibración es necesario tomar al menos tres medidas de un plano de calibración en diferentes configuraciones aunque se recomienda tomar unas 5 o 6.
- **5** Este botón realiza el proceso de calibración del sistema.
- **6** En esta caja se muestra el número de patrones que se tienen que proyectar y capturar cada vez que se obtiene una medida del plano de calibración.
- **7** En esta caja se muestra el número de medidas de los planos de calibración obtenidos. Para la realización de una calibración es necesario tomar al menos tres medidas de un plano de calibración en diferentes configuraciones aunque se recomienda tomar unas 5 o 6.
- **8** Nombre del fichero donde se va a almacenar el resultado de la calibración del sistema 3D.
- **9** Resultados de la calibración para la cámara.
- **10** Resultados de la calibración para el proyector.
- **11** Resultados de la calibración para el 3D rig.
- **12** Permite recorrer el árbol de directorios.

Apéndice II

Sistema de acoplo óptico a montura C para un proyector comercial

“Todo es muy difícil antes de ser sencillo”

Thomas Fuller

“Se debe hacer todo tan sencillo como sea posible,
pero no más sencillo”

Albert Einstein

El uso de un proyector comercial de luz limita el rango de proyección y enfoque de forma que su uso es inadecuado para algunas aplicaciones, como la medida 3D mediante triangulación activa de objetos pequeños (de varios centímetros) o grandes (de varios metros). Por otra parte, el uso de estos proyectores comerciales restringe la utilidad de los métodos de multiresolución. Por tanto, es necesario modificar la óptica del proyector para conseguir un mayor rango del campo de proyección.

All.1 Introducción

Los proyectores comerciales, vienen equipados con un objetivo de proyección que permite el enfoque a una serie de distancias, por lo general mayores de 3 metros con un campo fijo para cada distancia. Esto limita su uso en sistemas de medida 3D, especialmente para el método de multiresolución propuesto. Por tanto, es necesario modificar la óptica del proyector para conseguir un mayor rango del campo proyectado. Debido a consideraciones prácticas, se ha decidido

situar el proyector en el interior de una caja metálica y acoplar el nuevo sistema de proyección a dicha caja, con lo cual se simplifica el montaje y el alineamiento de la nueva óptica.

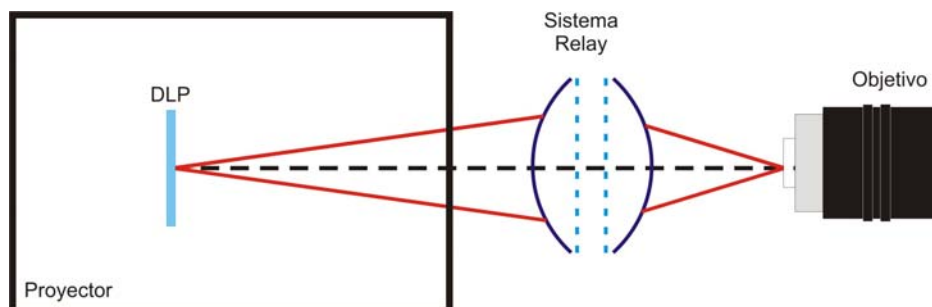


Figura AII.1 Esquema óptico del proyector modificado con el sistema de acoplo óptico “relay”

Para aumentar la flexibilidad del diseño, se ha decidido utilizar objetivos de proyección intercambiables. Para poder adaptar un objetivo de proyección a un proyector con la óptica extraída es necesario utilizar un sistema de acoplo óptico “relay” como se muestra en la Figura AII.1. Seguidamente se proporcionan los requerimientos de diseño del sistema.

AII.2 Requerimientos

El sistema de acoplo óptico tiene que formar una imagen real del chip DLP con las siguientes características:

- I. La imagen debe de estar acoplada con el campo objeto del objetivo de proyección. En nuestro caso se toma como campo objeto del objetivo 1/4” para poder acoplar cualquier objetivo comercial. Se estima el tamaño diagonal del chip DLP como 0.5”, con lo que un sistema con aumento $\beta' = -0.5\times$ es suficiente.
- II. La distancia entre el chip DLP y el objetivo de proyección debe estar limitada entre un mínimo de 100 y un máximo de 250 mm. Si la distancia es inferior a 100 mm, es necesario modificar la carcasa del proyector. Por

el contrario, si la distancia es superior a 250 mm el sistema sería muy inestable mecánicamente.

- III. La imagen del sistema de acoplo óptico debe tener buena calidad óptica, en particular la curvatura de campo y la aberración cromática deben estar controladas.
- IV. El sistema debe estar formado por lentes estándar de catálogo de alguno de los proveedores habituales de óptica técnica (LINOS, Thorlabs, Edmund Optics, etc.) para simplificar la adquisición de componentes.

All.3 Diseños

En [Marcén 08] el diseño de los sistemas de acoplo óptico consiste en dos lentes convergentes con marcha paralela ellas. Partiendo de este sistema básico, se han realizado dos modificaciones para tratar de mejorar la calidad de imagen. Finalmente se han considerado tres posibles diseños a evaluar.

- a) Sistema 1, formado por dos dobletes convergentes según el diseño básico de un sistema de acoplo óptico [Marcén 08].
- b) Sistema 2, formado por dos dobletes convergentes y un menisco positivo.
- c) Sistema 3, sistema simétrico formado por dos dobletes convergentes, dos dobletes divergentes y dos lentes plano paralelas convexas.

Para la evaluación de estos sistemas se ha utilizado el programa de diseño óptico WinLens® suministrado gratuitamente por la empresa LINOS. A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los diseños.

AII.3.1 Sistema 1

Este sistema está formado por dos dobletes del catálogo de LINOS. El primer doblete es el n° G32 2269 322 cuya focal es de 120 mm y su apertura 31.5 mm y el segundo es el G32 2306 322 de 60 mm de focal y 25.4 mm, la separación entre ambos es de 10 mm y la configuración del sistema es la representada en la Figura AII.2. El chip DLP se sitúa en el foco objeto de la primera lente, de modo que la imagen se forma en el foco imagen de la segunda lente.

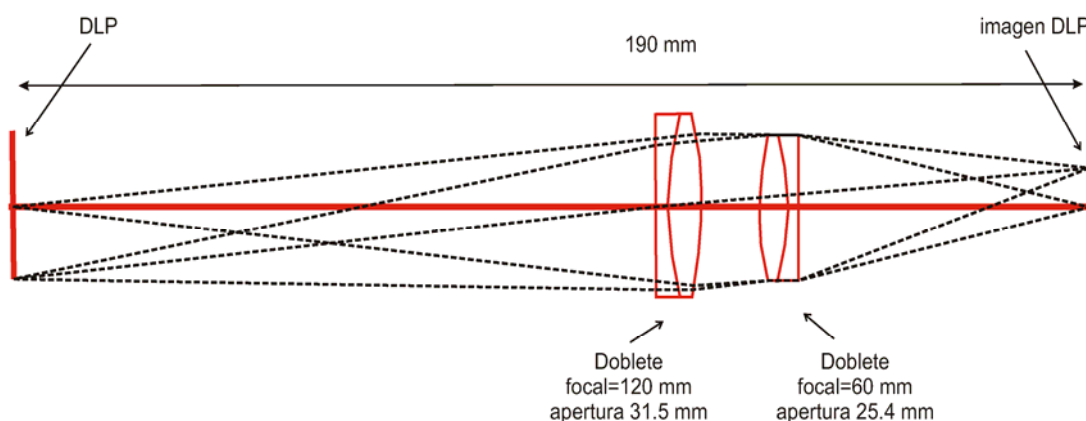


Figura AII.2 Trazado de rayos del sistema de acoplo óptico 1

En estas condiciones el aumento del sistema es $\beta' = -\frac{f'_2}{f'_1} = -\frac{60}{120} = -0.5\times$, y la

separación entre objeto-imagen es de 190 mm, de forma que el sistema es compatible con los requerimientos previos. Para comprobar la calidad de imagen obtenida mediante el sistema 1 se han calculado las aberraciones de Seidel usando el programa WinLens©. El resultado del cálculo se muestra en la Tabla AII.1.

AII.3.2 Sistema 2

En este sistema se propone añadir un menisco positivo a un sistema de dos dobletes para reducir las aberraciones de campo, especialmente la curvatura y el astigmatismo. Como contrapartida la aberración cromática y la esférica aumentarán. El sistema está representado en la Figura AII.3 y lo forman un doblete de 100 mm de focal y 50 mm de apertura (número de catálogo LINOS

G32 230 2000), seguido por otro doblete (G32 230 1000) de 80 mm de focal y 50 mm de diámetro y un menisco positivo (G31 555 1000) de 150 mm de focal y 42 mm de apertura.

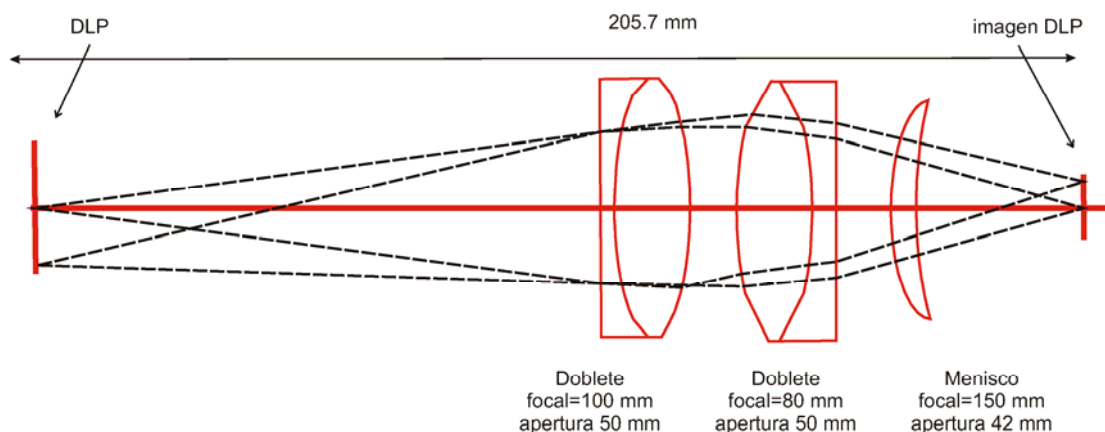


Figura AII.3 Trazado de rayos del sistema de acoplo óptico 2

Las características ópticas más importantes de este sistema son aumento $\beta' = -0.45\times$ y longitud entre objeto-imagen 205,7 mm, de nuevo dentro de las especificaciones requeridas. En cuanto a la calidad de imagen, el resultado se muestra en la Tabla AII.1.

AII.3.3 Sistema 3

En este caso optamos por un diseño de dos dobletes positivos de distinta focal (G32 232 3000, $f' = 80$ mm, $\varnothing = 22.5$ mm; G32 232 1000, $f' = 50$ mm, $\varnothing = 22.5$ mm) a los cuales añadimos dos dobletes negativos (G32 522 3000) de focal -75 mm y apertura 22.5 mm, y dos lentes convergentes biconvexas (G31 103 4000) de 100 mm de focal y 31 mm de diámetro. El sistema se muestra en la Figura AII.4. El objeto de añadir las lentes negativas era la disminución de la curvatura de campo, mientras que las lentes positivas biconvexas se añaden para minimizar en lo posible la aberración esférica y el coma.

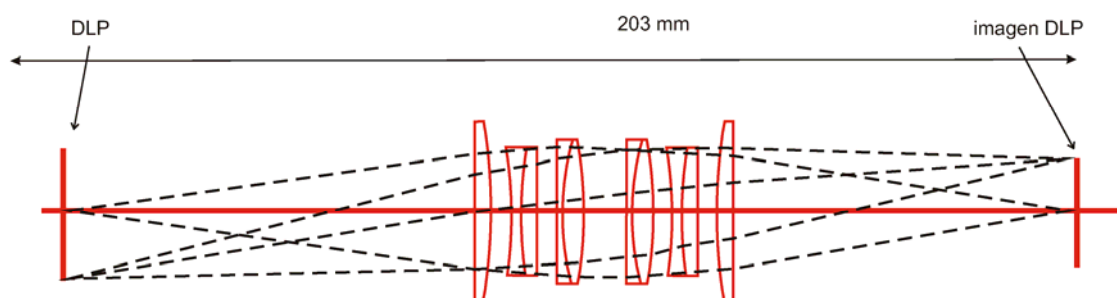


Figura AII.4 Trazado de rayos del sistema de acoplo óptico 3

El sistema tiene una longitud de 203 mm (por tanto, estaría en el límite admisible) y su aumento es $-0.51\times$, dentro también de las especificaciones requeridas. En cuanto a la calidad de imagen, los resultados se muestran en la Tabla AII.1.

AII.3.4 Comparación de sistemas.

Para poder comparar los sistemas calculados, hemos compilado en la Tabla AII.1, los valores de las aberraciones de Seidel y cromáticas obtenidos mediante el programa WinLens®. En la Tabla AII.1 todos los datos están dados en milímetros salvo la distorsión, que es un porcentaje y no tiene unidades.

	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
Ab. Esférica Trans.	0.2488	0.092	-0.2489
Coma Sagital	0.0050	0.0784	-0.0337
Coma Tangencial	0.0150	0.2352	-0.1012
Distancia foco Tang.	-1.5005	-0.8477	-1.7226

Distancia foco Sag.	-0.7071	-0.4554	-0.7640
Radio sup. Petzval	-57.2890	-51.3763	-60.8337
Distorsión fraccional	-0.5677%	-0.8295%	-1.5309%
Ab. Cromática Trans.	0.1577	0.2154	0.7167
Ab. Cromática Long.	0.0020	0.0192	0.0312

Tabla AII.1. Valores de las aberraciones de Seidel y Cromáticas (todos los datos en mm salvo la distorsión) para los sistemas estudiados, las aberraciones de Seidel se han hallado para una longitud de onda de 588 nm.

Como puede verse en la tabla los sistemas son muy similares en cuanto a calidad de imagen, con una cierta ventaja del sistema 1 en cuanto a menor aberración esférica y mejor aberración cromática, mientras que el sistema 3, aunque tiene una mejor curvatura de campo (mayor radio de la superficie de Petzval) es inferior en cuanto a aberración cromática mientras que el sistema 2 tiene un comportamiento peor que los otros dos. En estas condiciones, no merece la pena el aumento en la complejidad del diseño de los sistemas 2 y 3 frente al sistema 1 en términos de una ganancia neta de calidad de imagen.

AII.4 Realización práctica

Una vez establecido de forma preeliminar el diseño del sistema, se realizó una exploración entre las distintas casas comerciales para encontrar las lentes adecuadas. Como resultado se seleccionó un sistema óptico de acoplo óptico de la empresa Thorlabs referencia (MAP1075150-A1) debido a una integración más sencilla en la caja del proyector que el sistema 1. Se calculó el sistema de Thorlabs con el programa WinLens® y se comprobó que el comportamiento era

similar al sistema 1, con lo cual se procedió a su implementación en la caja del proyector utilizando componentes opto-mecánicos de dicha firma. De modo paralelo se adquirió una caja metálica en la empresa Farnell de dimensiones adecuadas para contener el proyector y se llevó a cabo la modificación de la misma para poder situar el proyector y la óptica de acoplo, el resultado puede verse en la Figura AII.5, donde se muestran varias vistas del sistema.

	
<p><i>Figura AII.5 (a) Vista del sistema de acoplo óptico</i></p>	<p><i>Figura AII.5 (b) Vista del sistema de acoplo óptico</i></p>
	
<p><i>Figura AII.5 (c) Vista general de la caja.</i></p>	<p><i>Figura AII.5 (d) Vista trasera de la caja</i></p>

All.5 Conclusiones

Se ha diseñado e implementado un sistema de acoplo óptico “*relay*” para sustituir la óptica de proyección de un proyector DLP BenQ PB2250. Se han evaluado tres sistemas mediante trazado real de rayos, resultando elegido el sistema más simple formado por dos dobletes de distinta focal. Se ha llevado la implementación práctica de dicho sistema hasta obtener un proyector modificado con capacidad de emplear cualquier objetivo compatible con rosca C/CS y con un campo objeto de $1/4''$. Si se acopla un objetivo zoom, el resultado es un proyector que puede variar el tamaño de campo proyectado sin modificar la distancia de enfoque, lo cual resulta necesario para poder disponer de un sistema de medida 3D multiresolución. Por otra parte, mediante un proyector con óptica intercambiable es posible medir mediante triangulación activa objetos muy pequeños o muy grandes, lo que sería imposible de realizar usando un proyector comercial convencional.

Referencias

[Andrä 97] P. Andrä, E. Ivanov, and W. Osten, “Scaled topometry—an active measurement approach for wide scale 3D surface inspection” in *Fringe 1997 3rd Intl. Workshop Automatic Processing Fringe Patterns*, W. Osten and W. Jüptner, Eds., pp. 179–189, Akademie-Verlag, Berlin (1997)

[Battle 98] J. Battle, E. Mouaddib, J. Salvi, “Recent progress in coded structured light as a technique to solve correspondence problem: a survey”, *Pattern Recognition*, 31(7) pp 963-982 (1998)

[Besl 92] P. J. Besl and N. D. McKay, “A method for registration of 3-D shapes” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 14(2), pp. 239-256, (1992)

[Bes 98] P. J. Besl, “Active optical range imaging sensors”, *Mach. Vision Appl*, 1(2) pp 127-152 (1998)

[Bergmann 95] D. Bergmann, “New approach for automatic surface reconstruction with coded light”, In Proc of SPIE, *Remote Sensing and Reconstruction for Three-Dimensional Objects and Scenes*, Vol. 2572, pp. 2-9 (1995)

[Blais 04] F. Blais, “Review of 20 years of range sensor development”, *Journal of Electronic Imaging*, 13(1), pp 231-240, (2004)

[Brenner 98] C. Brenner, J. Böhm., J. Gühring., “Photogrammetric calibration and accuracy evaluation of a cross-pattern stripe projector”, In Proc. of SPIE *Videometrics VI Conference*, ElHakim SF and Gruen A, eds., , Vol. 3641, pp. 164-172, (1998)

- [Brown 03] M.Z. Brown, D. Burschka, G.D. Hager, “Advances in computational stereo”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 25(8) pp. 993-1008 (2003)
- [Bruck 89] H. A. Bruck, S. R. McNeill, M. A. Sutton, W. H. Petters III, “Digital image correlation using Newton –Raphson method of partial differential correction” *Exp. Mech.* 29(3), pp. 261-267 (1989)
- [Carrihill 85] B. Carrihill, R. Hummel, “Experiments with the intensity ratio depth sensor”, In *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, Vol. 32, pp. 337-358 (1985)
- [Caspi 98] D. Caspi, N. Kiryati, and J. Shamir, “Range imaging with adaptive color structured light”, *IEEE-Transactions-on-Pattern-Analysis-and-Machine-Intelligence*, 20, pp 470-80 (1998)
- [Cerman 06] L. Cerman and V. Hlavac, “Exposure time estimation for high dynamic range imaging with hand held camera”. In *Computer Vision Winter Workshop*, (2006)
- [Chen 02] S. Y. Chen and Y. F. Li, "Self recalibration of a structured light vision system from a single view," In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Washington DC pp. 2539-2544 (2002)
- [Chu 85] T. C. Chu, W. F. Rasnson and M. A. Sutton, “Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics”, *Exp. Mech.* Vol. 25 pp 232-244 (1985)
- [Coggrave 00] C. R. Coggrave, J. M Huntley, “Optimization of a shape measurement system based on spatial light modulators”, *Opt. Eng.* 39(1), pp. 91-98 (2000)

- [Da 08] F. Da and S. Gai, “Flexibile three-dimensional measurement technique based on a digital light processing projector”, *Applied Optics*, Vol. 47(3), pp. 377–385 (2008).
- [Debevec 97] P. E. Debevec and J. Malik. “Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs”. In *SIGGRAPH 97*, pp. 369-78 (1997)
- [Eggert 98] D. W. Eggert, A. W. Fitzgibbon, and R. B. Fisher, “Simultaneous registration of multiple range views for use in reverse engineering of CAD models” *Comput. Vis. Image Underst.* 69(3), pp. 253–272 (1998)
- [Deriche 93] R. Deriche, G. Giraudon, “A computational Approach for Corner and Vertex Detection”, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 1, pp. 167-183 (1993)
- [Fiala 04] M. Fiala. “Artag, an improved marker system based on artoolkit”. In *National Research Council Publication, NRC 47166/ERB-1111* (2004)
- [Fiorentin 05] P. Fiorentin, P. Iacomuss and G. Rossi, “Characterization and Calibration of a CCD Detector for Light Engineering”, In *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 54(1), 171-177 (2005)
- [Grossberg 02] M. D Grossberg, S. K. Nayar, “What can be known about the radiometric response function from images?”, In *IV European Conference on Computer Vision*, pp. 189-205 (2002)
- [Grossberg 04] M. D. Grossberg, H. Peri, S. K. Nayar and P. N. Belhumeur, “Making One Object Look Like Another: Controlling Appearance Using a Projector-Camera System”, In *Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Vol. 1, pp 452-459 (2004)
- [Gühring 00] J. Gühring, C. Brenner, J. Böhm, D Fritsch. “Data processing and calibration of a cross-pattern stripe projector”, in *ISPRS Congress 2000, APRS* 33(5), Amsterdam (2000).

- [Gühring 01] J. Gühring, “Dense 3-d surface acquisition by structured light using off-the-shelf components”, In *Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement*, Vol. 4309, pp. 220-231 (2001)
- [Gunderloy 04] M. Gunderloy, “Coder to Developer: Tools and Strategies for Delivering Your Software”, SYBEX Inc. (2004)
- [Gunderloy 05] M. Gunderloy, “Developer to Designer: GUI Design for the Busy Developer”, SYBEX Inc. (2005)
- [Haralick 92] Robert M. Haralick, Linda G. Shapiro, “Computer and Robot Vision”, Volume I, Addison-Wesley, pp. 28-48 (1992)
- [Harris 88] C. Harris, M. Stephens, “A Combined Corner and Edge Detector”, *Fourth Alvey Vision Conference*, pp. (1988)
- [Heikkilä 00] J. Heikkilä, “Geometrical Camera Calibration Using Circular Control Points”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22(10) (2000)
- [Hibino 95] K. Hibino, B. F. Oreb., D. I. Farrant., “Phase shifting for nonsinusoidal waveforms with phase-shift errors”, *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision*, 12(4), pp. 761-768 (1995)
- [Huntley 99] J. M. Huntley., C. R. Coggrave, “Optimization of a shape measurement system based on a spatial light modulators”, In Proc. of SPIE, *Laser Metrology and Inspection*, Vol. 3823, pp. 104-114 (1999)
- [HZ 00] Hartley R., Zisserman A.: Multiple view geometry in computer vision. Cambridge University Press (2000)
- [ISM 84] S. Inokuchi, K. Sato, F. Matsuda, “Range imaging system for 3D object recognition”, In Proc. Int. Conference on Pattern Recognition, IAPR and IEEE, pp. 806-808. (1984)

- [Jia 07] P. Jia, J.Kofman, C. English, “Comparison of linear and nonlinear calibration methods for phase-measuring profilometry”, *Opt. Eng.* 46(4), pp 043601-10 (2007)
- [Jin 06] S. Q. Jin, L. Q. Fan, Q. Y. Liu and R. S. Lu, “Novel Calibration and Lens Distortion Correction of 3D Reconstruction Systems”, *J. Phys: Conf. Ser.*, Vol. 48, pp. 359-363 (2006)
- [Krattenthaler 93] W. Krattenthaler, K. J. Mayer, Hans-Peter. Duwe, “3D- Surface Measurement with Coded Light Approach”, *In Proc. of the Öesterr. Arbeitsgem. Musterner Kennung*, Vol. 12, 103-114 (1993)
- [Kayser 99] D. Kayser, T. Bothe, and W. Osten, “Fault detection in gray-value images of surfaces on different scales” *In Proc. SPIE 2744*, pp. 110–117 (1999)
- [Kayser 04] D. Kayser, T. Bothe W. Osten. “Scaled topometry in a multisensor approach”, *Opt. Eng.*, 43 pp 2469–2477 (2004)
- [Knyaz 04] V. A. Knyaz, “Automated calibration technique for photogrammetric system based on a multi-media projector and a CCD camera”, *In Proc. of the ISPRS: Image Engineering and Vision Metrology*, 36(5) (2006)
- [Kovesi 00] P.D Kovesi, MATLAB and Octave Functions for Computer Vision and Image Processing, School of Computer Science & Software Engineering, The University of Western Australia. Available from: <http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/research/matlabfns/> (2000)
- [Legarda 04] R. Legarda-Sáenz, T. Bothe and W. Jüptner, “Accurate procedure for the calibration of a structured light system”, *Opt. Eng.* Vol. 43(2), pp 464-471 (2004)
- [Li 03] Y. F. Li, and S. Y. Chen, “Automatic recalibration of an active structured light vision system”, *IEEE-Transactions-on-Robotics-and-Automation* 19 pp 259-68 (2003)

- [Lie 03] Y. F. Lie, Y. Chen, “Automatic recalibration of an active structured light vision system”, *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, 19(2), (2003)
- [Liu 03] H. Liu, W. Su, K. R. Yin and S. Yin, “Calibration-based phase-shifting projected fringe profilometry for accurate absolute 3D surface profile measurement”, *Optics Communications*, Vol. 216, pp. 65-80 (2003).
- [Lu 03] R. S. Lu, and Y. F. Li, “Calibration of a 3D vision system using pattern projection” *Sensors-and-Actuators-A-Physical*, A104 pp 94-102 (2003)
- [MacWilliams 76] F. J. MacWilliams, N. J. A. Sloane, “Pseudorandom sequences and arrays”, In Proc. of IEEE, 64(12), pp. 1715-1729 (1976)
- [Marcén 08] J. Marcén, “Instrumentos Ópticos y Optométricos”, Universidad Complutense de Madrid (2008)
- [Morano 98] R. A Morano, C. Ozturk, R. Conn, S. Dubin, S. Zietz, J. Nissanov, “Structured light using pseudorandom codes”, In. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(3), pp. 322-327 (1998)
- [More 77] J.J Moré, “The levenberg-marquardt algorithm, implementation and theory”, *Numerical Analysis*, Lecture Notes in Mathematics, Vol. 630. Springer-Verlag, (1977)
- [MKS 81] M. Minou, T. Kanade, T. Sakai, “A method of time-coded parallel planes of light for depth measurements”, *Transactions of the IECE*, 64, pp. 521-528 (1981).
- [Nayar 03] S. K. Nayar, H. Peri, M. D. Grossberg and P. N. Belhumeur, “A Projection System with Radiometric Compensation for Screen Imperfections”, *IEEE International Workshop on Projector Camera Systems (PROCAMS)* (2003)

[Notni 01] G. Notni, “360-deg shape measurement with fringe projection—calibration and application” in *Fringe 2001-4th Intl. Workshop Automatic Processing Fringe Patterns*, W. Osten and W. Jüptner, Eds., pp. 311–323, The Data Science Library, Elsevier, Paris (2001)

[Osten 99] W. Osten, P. Andrä, and D. Kayser, “Highly-resolved measurement of extended technical surfaces with scalable topometry” *Tech. Mess.* 66(11), pp. 413–428 (1999)

[PA 82] J. Posdammer, M. Altschuler, “Surface measurement by spaceencoded projected beam systems”, *Computer Graphics and Image Processing*, 18(1), pp 1-17 (1982)

[Pages 03] J. Pages; J. Salvi, R. Garcia, and C. Matabosch. “Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling”, *Proc. of the IEEE-International Conference on Robotics and Automation*, 1, 133-8, (2003)

[Peters 82] W. H. Peters and W. F. Ranson, “Digital imaging techniques in experimental mechanics”, *Opt. Eng.* Vol. 21, pp. 427-431 (1982)

[Pollefeys 00] M. Pollefeys: 3D Modelling from Images. *Tutorial at ECCV 2000*, Katholieke Universiteit Leuven

[Salvi 02] J. Salvi, X. Armangué, J. Batlle, “A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation”, *Pattern Recognition* 35(7) pp 1617–1635. (2002)

[Salvi 04] J. Salvi, J. Pages and J. Batlle, “Pattern Codification Strategies in Structured Light Systems”, *Pattern Recognition*, 37(4) pp 827-849 (2004)

[Sanson 99] G. Sansoni, M. Carocci and Rodella, “Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: analysis and compensation of the systematic errors”, *Applied Optics*, Vol. 38, pp. 6565–6573 (1999).

- [Scharstein 03] D. Scharstein, R. Szeliski, "High-Accuracy Stereo Depth Maps Using Structured Light". In *Computer Vision and Pattern Recognition*, 1, pp. 195-202 (2003)
- [Schreiber 00] W. Schreiber, G. Notni, "Theory and arrangements of self-calibrating whole-body three-dimensional measurement systems using fringe projection technique", *Opt. Eng.* 39, pp. 159-169 (2000)
- [SHNR 01] H. Steinbichler, E. Heinrich Nösekabel, R. Rösch, "Optical inspection in the production line" In *Fringe 2001, 4th Intl. Workshop Automatic Processing Fringe Patterns* W. Osten and W. Jüptner, Eds., pp 311–323 (2001)
- [Shu 03] C. Shu, A. Brunton, M. Fiala, "Automatic Grid Finding in Calibration Patterns using Delaunay Triangulation", In *National Research Council Canada NRC/ERB-1104* (2003)
- [SNS 04] P. Soon-Yong, L. Namho, K. Seungho. "Stereoscopic imaging camera with simultaneous vergence and focus control", *Opt. Eng.*, 43 pp 3130-3137 (2004)
- [SS 03] D. Scharstein, R. Szeliski, "Programmable imaging digital micromirror array", In *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp 195-202 (2003)
- [Ströbel 96] B. Ströbel, "Processing of interferometric phase maps as complex-valued phasor images", In *Applied Optics*, 35, pp. 2192-2197 (1996)
- [Su 04] W. H. Su, C. Y. Kuo, C.C Wang, C. F. Tu, "Projected fringe profilometry with multiple measurements to form a entire shape", *Optics Express*, 16(6), pp. 4069-4077 (2004)
- [Sutton 00] M. A. Sutton, S. R. Mc Neil, J. D. Helm and Y. J. Chao, "Advances in 2D and 3D computer vision for shape and deformation measurements" *Photomechanics*, pp 323-372

- [Tajima 90] J. Tajima, M. Iwakawa, "3-D data acquisition by rainbow range finder", In *Int. Conf. on Pattern Recognition*, pp. 309-313 (1990)
- [Tiwari 06] V. Tiwari, M.A Sutton and S.R McNeill, "Assessment of High Speed Imaging Systems for 2D and 3D Deformation Measurements: Methodology Development and Validation", *Exp. Mech.* 47(4) pp. 561-579 (1985)
- [Trucco 98] E. Trucco, A. Verri: *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*. Prentice Hall (1998)
- [Trobina 95] M. Trobina, "Error Model of a Coded-Light Range Sensor", *BIWI-TR-164*. Tech. rep., Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich (CH), ITET/BIWI, (1995)
- [Tsai 87] R. Y. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses", *IEEE J. Robotics Automat.*, Vol. RA-3, (4), pp 323-344 (1987)
- [Tsai 86] R. Y Tsai, "An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision", In *Proc of IEEE Conference on CVPR*, pp. 364-374, (1986)
- [Vargas 07] J. Vargas, J. A. Quiroga, M. J. Terrón-López, "Flexible calibration procedure for fringe projection profilometry", *Opt Eng.* 46(2), pp 023601-6 (2007)
- [Vargas 08] Javier Vargas, J.A Quiroga, "A Novel multiresolution approach for an adaptable structured light" *Opt. Eng.* 47(2) (2008)
- [Vargas 09] J. Vargas, J. A. Quiroga, "A multiresolution approach based on projection matrixes", *Applied Optics*, 48(7), pp. 1295-1302 (2009)

- [VKQG 08] J. Vargas, T. Koninckx, J. A. Quiroga, L. V. Gool, “Three-dimensional measurement of microchips using structured light techniques”, *Opt. Eng.*, 47(5), (2008)
- [VQ 08] Javier Vargas, J.A Quiroga, “Defect inspection by an active 3D multiresolution technique” *In Proc. of the SPIE, LM2008* Singapore (2008)
- [VM 98] R.J. Valkenburg, A.M. McIvor, “Accurate 3d measurement using a structured light system”, *Image Vision Comput.*, 16(2), pp. 99–110 (1998)
- [Wiora 00] G.Wiora, “High resolution measurement of phase-shift amplitude and numeric object phase calculation,” *In Proc. SPIE Vol. 4117*, pp. 289–299 (2000)
- [Xiaoling 05] Z. Xiaoling, L. Yuchi, Z. Meirong, N Xiaobing and H. Yinguo, “Calibration of a fringe projection profilometry system using virtual phase calibrating model planes”, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* Vol. 7(4), pp 192-197 (2005)
- [YSK 04] Y. Ma, S. Soatto, J. Kosecka, S. Shankar: *An invitation to 3-D Vision*. Springer-Verlag, New York, Inc (2004)
- [Yu 06] C. Yu, Q. Peng, “Robust recognition of checkboard pattern for camera calibration”, *Opt. Eng.*, 45(9) (2006)
- [Zhang 99] Z. Zhang, “Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientations”, *In Proc. Int. Conf. of Computer Vision* (1999)
- [Zhang 00] Z. Zhang, “A Flexible new technique for camera calibration”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), pp.1330-1334 (2000)
- [Zheng 04] F. Zheng, and B. Kong, “Calibration of linear structured light system by planar checkerboard”, *In Proc. IEEE Int. Conf. on Information Acquisition*, 21(25), pp. 344-346 (2004)

[Zhong 01] Z. W. Zhong, C. P. Han, A. K. Asundi, "A Study of Parameters Affecting the Sensitivity of a 3-D Measurement System Using the Phase Shifting Technique", In Proc. of the SPIE, *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection II*, Vol. 4398 (2001)

